



Cláudia Dias Sequeira
Mestrado em Engenharia Mecânica

A análise de vibrações como ferramenta para a melhoria da manutenção em aerogeradores

Dissertação para obtenção do Grau de Doutor em
Engenharia Mecânica

Orientador:
Prof. Doutor António Paulo Urgueira, Prof Associado,
Faculdade Ciências e Tecnologia



Setembro de 2012

“Copyright” Cláudia Dias Sequeira, FCT/UNL e da UNL,

“A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpetuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.”

Agradecimentos

Ao Professor Doutor António Paulo Vale Urgueira, meu orientador, apresento os maiores agradecimentos no que se refere ao rigor científico em termos de orientação da presente dissertação, que decorreu de forma inexcedível, não esquecendo de referir a sua total disponibilidade para esclarecimento de dúvidas pontuais.

Ao professor Doutor João Cardoso, apresento igualmente os maiores agradecimentos pelos conhecimentos científicos transmitidos, particularmente na área do tratamento de sinais.

Não poderia deixar de agradecer à Iberwind, a empresa detentora do maior parque eólico nacional, cujo apoio foi decisivo para a realização da investigação realizada, através da disponibilização dos aerogeradores para casos de estudo e do financiamento de todo o equipamento necessário para a recolha de vibrações, a nível de componentes mecânicos e da monitorização da torre.

Ao Eng.^o Rui Maia, gostaria de agradecer o tempo disponibilizado e a criação de todas as condições materiais para que o trabalho evoluísse positivamente.

Aos Eng.^{os} Rodrigo Pena, Tiago Silva, João Barrambana, entre tantos outros, um especial obrigado por toda a colaboração e apoio prestado.

Por último, quero agradecer à minha família, pelo seu constante apoio e incentivo, particularmente nos momentos mais difíceis.

“ A elaboração desta dissertação beneficiou do regime de isenção de propinas de doutoramento, no âmbito do acordo específico de cooperação existente entre a Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa e o Instituto Superior de Engenharia da Universidade do Algarve.”

Cláudia Dias Sequeira

Ao Milton e ao João Maria

Resumo

O presente estudo constitui uma dissertação para a obtenção do Grau de Doutoramento em Engenharia Mecânica. O seu principal objetivo foi analisar as vibrações para compreender o modo como uma ferramenta deste tipo pode contribuir para uma melhoria em termos de manutenção em aerogeradores de parques eólicos, otimizando a manutenção destes equipamentos, pela redução das perdas de produção de energia e dos custos finais de manutenção.

A investigação procurou igualmente identificar as principais fontes de vibrações transmitidas ao sistema e à sua estrutura, de forma a compreender o comportamento à fadiga dos componentes mecânicos de geradores eólicos.

Através deste estudo, a manutenção pode ser planeada num formato mais eficiente, podendo também os aerogeradores já existentes obterem melhorias significativas através da utilização de um novo modelo de manutenção em aerogeradores, recorrendo não só às vibrações, mas também às análises de óleos, à termografia e à endoscopia.

Através destas ferramentas e analisando o histórico de avarias, será possível detetar a falha numa fase inicial, conhecer a sua origem e calcular aproximadamente o seu tempo de vida.

O acompanhamento das avarias registadas possibilitou a sua catalogação com vista à criação de uma base de dados referente ao parque eólico nacional e foi possível quantificar a contribuição para as avarias mecânicas precoces, através das vibrações sentidas na torre pela influência da força “vento”, mediante a instalação de sensores de baixa frequência nas três plataformas interiores da torre.

A manutenção condicionada baseada nas vibrações é uma ferramenta deveras importante, o mesmo sucedendo com a utilização de novos materiais, incluindo lubrificantes e componentes mecânicos.

Palavras-chave:

Vibrações.

Estruturas.

Amplitudes térmicas.

Análise aos óleos.

Paragens súbitas.

Diagnóstico de avarias.

ABSTRACT

The present work leads to the accomplishment of this PhD dissertation in Mechanical Engineering and shows the use of vibration analysis as a tool for improving maintenance on wind turbines.

Through this study it is possible to understand how vibration analysis can optimize the maintenance of wind turbines in respect of energy production losses and the consequential increases in the final maintenance costs. It also aims to identify the main sources of vibration systems and their structures in order to understand the fatigue behavior of the turbines mechanical components.

In consequence of these findings, maintenance can be planned in a more efficient manner of both new and existing wind turbines using, not only the vibration systems, but also the analysis of oils and endoscopy.

Using the above tools and through the history of malfunctions, you can detect any faults at an early stage, know their origin and roughly calculate the turbines and their components lifetime.

It should not be overlooked that the vibration collections are made from off the top of a tower with a height of 80 meters, a fact that contributes to false alarms in the conditioning monitoring system. In order to quantify the influence of the tower vibrations felt by the force of winds, low frequency sensors are installed inside the tower.

KEYWORDS

Vibrations.

Structures.

Temperature ranges.

Analysis of oils.

Stops.

Faults.

ÍNDICE DE MATÉRIAS

1 – Notas Introdutórias	21
1.1 - Motivação	23
1.2 - Objetivos	24
1.3 – Estado da Arte	25
1.4 - Metodologia	26
1.5 - Enquadramento teórico da análise de vibrações na manutenção condicionada	26
1.6 – Revisão bibliográfica	27
2 - Aerogeradores	31
2.1 – O seu princípio de funcionamento	31
2.2 – Os principais componentes	33
2.2.1 – O rotor	34
2.2.2 – A torre	35
2.2.3 – A caixa multiplicadora	36
2.2.4 – O gerador	36
2.2.5 – A <i>Nacelle</i>	37
2.2.6 – Os sistemas de regulação	38
2.2.7 – Os sistemas de travagem	38
2.2.8 – Os sistemas de controlo da posição da <i>nacelle</i>	39
2.2.9 – A sinalização aérea	39
2.2.10 – A proteção contra descargas atmosféricas	39
2.2.11 – O SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition)	39
2.2.12 – O CMS (Conditioning Monitoring System)	40
2.2.13 – Os sensores	41
2.2.13.1 - Seleção e instalação de sensores de Medição	41
2.3 – Instalação de parque eólico	43
2.4 – Avarias típicas de aerogeradores	43
2.4.1 - Rolamentos defeituosos	44
2.4.1.1 - Causas da falha dos rolamentos	45
2.4.1.2 - Fases de degradação dos rolamentos	47
2.4.2 - Defeitos em engrenagens	49
2.4.2.1 – Desgaste das engrenagens	50
2.4.2.2 – Frequências de engrenamento da caixa multiplicadora	50
2.4.3 - Problemas de lubrificação	52
2.4.3.1 - Importância dos aditivos no lubrificante	53
2.4.3.2 – Degradação de lubrificantes	53
2.5 – Manutenção de caixas multiplicadoras em Aerogeradores	54
2.5.1 – Os procedimentos para a substituição de óleo	54
2.5.1.1 – Central hidráulica	56
2.5.1.2 – Caixa do pitch	56
2.5.1.3 – Caixa do yaw system	56
2.5.1.4 – Reposição do nível de óleo	56
3. Tecnologias de Medição para avaliação do Estado de Condição em Aerogeradores	57
3.1 Conceitos básicos de vibração para análise de vibrações	57
3.1.2 Frequência Natural	58
Onde m , é a massa do sistema, c , o amortecimento e k a sua rigidez.	58
3.1.3 Movimento Harmónico	58
3.1.4 Amplitude	59
3.1.4.1 Amplitude da vibração (RMS)	59
3.1.4.2 Amplitude da Vibração em Análise Envelope	60
3.1.5 Processamento de Sinais vibratórios	60
3.1.5.1 Aliasing	62
3.1.5.2 Windowing – Efeitos do tipo de janela	63
3.1.6 – A análise de valor global	64
3.1.7 – A análise de espectral	65
3.1.8 – A análise de tendência	65
3.1.7 – Importância do conhecimento das características dinâmicas da estrutura	66

3.2 – Análise de óleos.....	67
3.2.1 – Interpretação de Resultados.....	67
3.3 Endoscopia	68
4 - Caso Estudo Parque Eólico Freita e Lousã	70
4.1 - Introdução.....	70
4.2 - Caso de Estudo do Parque Eólico da Freita	71
4.2.1 - Aerogerador Nº1	72
4.2.1.1 - Vibrações no aerogerador Nº1	72
4.2.1.2 - Análise de óleos no aerogerador Nº1	76
4.2.1.3 - Amplitudes térmicas no Aerogerador Nº1	78
4.2.1.4 - Paragens forçadas no Aerogerador Nº1	78
4.2.1.5 - Conclusões para o Aerogerador Nº1	80
4.2.2 - Aerogerador Nº2	80
4.2.2.1 - Vibrações no Aerogerador Nº2.....	81
4.2.2.2 - Análise de óleos no Aerogerador Nº2.....	82
4.2.2.3 - Amplitudes térmicas no Aerogerador Nº2.....	82
4.2.2.4 - Paragens forçadas no Aerogerador Nº2.....	83
4.2.2.5 - Conclusões para o Aerogerador Nº2	83
4.2.3 - Aerogerador Nº3	84
4.2.3.1 - Vibrações no Aerogerador Nº3.....	85
4.2.3.2 - Análise de óleos no Aerogerador Nº3.....	85
4.2.3.3 - Amplitudes térmicas no Aerogerador Nº3.....	86
4.2.3.4 - Paragens forçadas no Aerogerador Nº3.....	87
4.2.3.5 - Conclusões para o Aerogerador Nº3	88
4.2.4 - Aerogerador Nº4	88
4.2.4.1 - Vibrações no Aerogerador Nº4.....	89
4.2.4.2 - Amplitudes térmicas e análise ao óleo no Aerogerador Nº4.....	90
Figura 68 – Gráfico da análise de óleo ao gerador nº4 em ppm	90
4.2.4.3 - Paragens forçadas no Aerogerador Nº4.....	91
4.2.4.4 - Conclusões para o Aerogerador Nº4	91
4.2.5 - Aerogerador Nº5	91
4.2.5.1 - Análise de óleos no Aerogerador Nº5.....	92
4.2.5.2 - Amplitudes Térmicas no Aerogerador Nº5.....	93
4.2.5.3 - Paragens Forçadas no Aerogerador Nº5.....	93
4.2.5.4 - Conclusões para o Aerogerador Nº5	94
4.2.6 - Aerogerador Nº6	94
4.2.6.1 - Vibrações no Aerogerador Nº6.....	95
4.2.6.2 - Análise de óleos no Aerogerador Nº6.....	95
4.2.6.3 - Amplitudes térmicas no Aerogerador Nº6.....	96
4.2.6.4 - Paragens forçadas no Aerogerador Nº6.....	97
4.2.6.5 - Conclusões para o Aerogerador Nº6	97
4.2.7 - Aerogerador Nº7	98
4.2.7.1 - Vibrações no Aerogerador Nº7.....	98
4.2.7.2 - Análise de óleos no Aerogerador Nº7.....	99
4.2.7.3 - Amplitudes térmicas no Aerogerador Nº7	100
4.2.7.4 - Paragens Forçadas no Aerogerador Nº7	100
4.2.7.5 - Conclusões para o Aerogerador Nº7	101
4.2.8 - Aerogerador Nº8	101
4.2.8.1 - Análise de óleos no Aerogerador Nº8.....	102
4.2.8.2 - Paragens forçadas no Aerogerador Nº8.....	102
4.2.9 - Análise de resultados do parque da Freita	103
4.2.9.1 - Conclusões e sugestões do parque eólico da Freita.....	104
4.3 - Caso de Estudo do Parque Eólico da Lousã.....	106
4.3.1 - Aerogerador Nº80921	107
4.3.2 - Aerogerador Nº80926	107
4.3.3 - Aerogerador Nº80930	108
4.3.4 - Comparação do Desgaste da Pista Interna	108
4.3.6 - Comparações de espectros nos rolamentos na zona do acoplamento.....	110
4.3.7 - Conclusões e sugestões do parque eólico da Lousã	111
4.4 – Conclusões Gerais dos Parques Eólicos da Freita e Lousã	112
5 - Trabalho Experimental – TE 3 Meroicinha	114

5.1 - Descrição do modelo Experimental	114
5.2 - Introdução de dados cinemáticos	116
5.3 - Descrição do Modelo Físico e Instalação de Sensores na Torre	118
5.4 - 1º Fase do Trabalho Experimental	120
5.4.1 - Recolha de dados do CMS e Torre	121
5.4.1.1 - Comparação de resultados do CMS com Torre	122
5.5 - Análise de dados – Torre Eólica.....	128
5.6 - 2º Fase do Trabalho Experimental - Torre	129
5.6.1 - Recolha e análise de dados da torre	131
5.6.2 - Recolha e análise de dados da Nacelle.....	134
5.7 – Análise de resultados	136
6 – Conclusões	139
Sugestões para trabalhos futuros.....	142
7 - Bibliografia.....	143
Anexos	148
Anexo A.....	148
A.1 – Gráficos comparativos dos vários pontos 1,2 e 3 na torre e CMS com velocidade de vento igual de 9,4 m/s.	148
A.2 – Espectro comparativos das amplitudes no CMS com velocidade de vento igual a 15,5 m/s	149
A.3 – Registo da velocidade do vento e da direção nas datas 15 de julho e 17 de agosto de 2011	149
A.4 – Alarme CMS proveniente da chumaceira principal	150
A.5 – Espectro envelope no rolamento do veio de alta velocidade (HSS) após alarme	150
A.5.1 – Espectro envelope veio de alta velocidade (HSS) após substituição do rolamento no veio de alta velocidade.....	151
A.6 – Tabela de registo das maiores amplitudes identificadas na torre, 30-07-2011 (10 m/s)...	152
Anexo B.....	153
B.1 – Tabela com registo da velocidade do vento, direções e potência da Meroicinha.....	153
B.2 – Tabela com interligação dos dados com velocidades de vento semelhantes	154
B.3 – Tabela de acesso aos dados da torre – vibrações UFF	154
B.4 – Características técnicas parque eólico da Meroicinha	155
Anexo C.....	156
C.1 – Informação técnica dos sensores de vibração - CMS.....	156
C.2 – Informação técnica dos sensores de vibração baixa frequência - Torre.....	158
C.3 – Informação técnica dos rolamentos da caixa multiplicadora	159
C.4 – Informação técnica das rodas dentadas da engrenagem	161
C.5 – Informação dos tipos de óleo para caixas multiplicadoras	165
C.6 – Informação dos diferentes tipos de armazenamento	165
Anexo D.....	166
D.1 – Características dos Aero geradores Nordex.....	166
D.2 – Características dos Aero geradores Vestas	169
Anexo E.....	176
E.1 – Características da torre - Vestas.....	176
Anexo F.....	179
E.1 – CMS – ligações aos canais.....	179
Anexo G	180
G.1 – Características da Caixa multiplicadora - Localização dos sensores	180

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Evolução da potencia instalada em Portugal Continental (MW) [1].....	25
Figura 2 - Parque eólico com aerogeradores Vestas	31
Figura 3 - Curva de potência do aerogerador Vestas V80-2MW [20].....	32
Figura 4 - Interior de uma <i>nacelle</i> com os respetivos equipamentos [25]	33
Figura 5 - Conjunto Rotor e torre – Vestas V80-2MW	34
Figura 6 - Seção do interior de uma pá [26].....	34
Figura 7 - Pás antes da montagem.....	35
Figura 8 - Vista de baixo do exterior e do interior da torre – Vestas V80-2MW	35
Figura 9 - Caixa multiplicadora Winergy – Vestas V80-2MW	36
Figura 10 - Caixa da Nacelle	37
Figura 11 - Cubo do rotor	38
Figura 12 - Sistema de travagem de emergência.....	38
Figura 13 - Sistema de sinalização Aérea.....	39
Figura 14 - Sistema de controlo de dados	40
Figura 15 – Controlador de dados de vibrações - CMS.....	40
Figura 16 - Localização dos pontos de recolha de vibrações	41
Figura 17 – Ligação dos sensores aos 8 dos 16 canais disponíveis [18].....	42
Figura 18 - Sensor na caixa multiplicadora (<i>gearbox</i>) – base permanente roscada	42
Figura 19 - Instalação e transporte de componentes aerogeradores.....	43
Figura 20 – Tempos de paragem / origem das falhas [2]	44
Figura 21 – Defeito na pista interna do rolamento do veio de alta velocidade	45
Figura 22 - Ondas elásticas provenientes de rolamentos defeituosos	45
Figura 23 - Rolamento de rolos skf.....	46
Figura 24 – Características técnicas de um rolamento de rolos skf	46
Figura 25 - Frequências de defeito [11]	47
Figura 26 - Espectro típico de defeitos em rolamentos	48
Figura 27 – Identificação da localização das engrenagens e rolamentos [Anexo D-1]	51
Figura 28 – Fórmulas para o cálculo das frequências de defeito em engrenagens [46]	51
Figura 29 – Espectro de frequências de defeito em engrenagens acompanhado de bandas laterais..	52
Figura 30 - Procedimentos para a substituição de óleo a uma altura de 80m.....	55
Figura 31 – Camião de transporte de óleo.....	55
Figura 32 – Queda de Aerogerador em Vila do Bispo	57
Figura 33 – Movimento Harmónico Simples	58
Figura 34 – Representação das unidades de medida da Amplitude	59
Figura 35 – Forma de onda no domínio do tempo e frequência	61
Figura 36 – <i>Aliasing</i> , neste caso, a frequência de amostragem é inferior à do sinal , o que ocasiona uma incorrecta interpretação da frequência deste	62
Figura 37 – Registo dos valores globais ao longo do tempo	64
Figura 38 – Curva de tendência	66
Figura 39 – Endoscopia realizada no interior de uma caixa multiplicadora – Fenómeno condensação	68
Figura 40 – Câmara para a realização das endoscopias.....	69
Figura 41 – Imagens obtidas através da câmara de endoscopia.....	69
Figura 42 - Endoscopia Aerogerador nº1	72
Figura 43 – Registo de valores globais no sensor do veio de alta velocidade saída da caixa multiplicadora	72
Figura 44 - Espectro (envolvente) de vibrações do rolamento do veio de alta velocidade.....	73
Figura 45 - Endoscopia ao rolamento a) bom estado b) nível avançado degradação,	73
Figura 46 - Substituição do par de rolamentos na saída da caixa (veio alta velocidade).....	74
Figura 47 – Valores globais no veio de alta velocidade.....	74
Figura 48 - Espectro de vibrações na caixa multiplicadora nº1	75
Figura 49 – Espectro (envolvente) de vibrações WT Nº1	75
Figura 50 - Gráfico da análise de óleo WT Nº1 em ppm	76
Figura 51 - Gráfico dos ventos, temperaturas, paragens e produção	76
Figura 52 – Imagens do interior da caixa no mês anterior à sua substituição e valores da análise de óleos no mês de maio de 2010	77
Figura 53 – Evolução de amplitude de temperatura ao longo do triénio	78
Figura 54 - Gráfico de paragens provocadas por ventos superiores a 25m/s.	79
Figura 55 – Endoscopia ao anel do estágio planetário.....	79
Figura 56 - Engrenagens e rolamentos danificados	81
Figura 57 - Espectro de vibrações na caixa multiplicadora nº2 – sensor Gb2.....	81

Figura 58 - Gráfico da análise ao óleo aerogerador nº2	82
Figura 59 - Gráfico de amplitudes térmicas mensais.....	83
Figura 60 - Gráfico de paragens devido a ventos superiores a 25m/s	83
Figura 61 - Espectro (envolvente) de vibrações na caixa multiplicadora WT Nº3.....	85
Figura 62 - Gráfico da análise ao óleo aerogerador nº3 em ppm.....	86
Figura 63 - Gráfico de amplitudes térmicas mensais.....	86
Figura 64 - Endoscopia realizada no final do presente estudo – Nov.2011.....	87
Figura 65 - Gráfico de paragens determinada por ventos superiores a 25 m/s.....	87
Figura 66 - Espectro de vibrações na caixa multiplicadora nº4 – Gb3	89
Figura 67 - Substituição do par de rolamentos do veio alta velocidade	89
Figura 68 - Gráfico de amplitudes térmicas mensais.....	90
Figura 69 - Gráfico de paragens devido a ventos superiores a 25m/s	91
Figura 70 - Endoscopia caixa multiplicadora aerogerador nº5.....	92
Figura 71 - Gráfico da análise de óleo WT Nº5 em ppm	92
Figura 72 - Gráfico de amplitudes térmicas mensais.....	93
Figura 73 - Gráfico de paragens devido a ventos superiores a 25m/s	93
Figura 74 - Espectro de vibrações na caixa multiplicadora WT Nº6.....	95
Figura 75 - Gráfico análise de óleos aerogerador nº6 em ppm.....	96
Figura 76 - Gráfico de amplitudes térmicas mensais.....	96
Figura 77 - Gráfico de paragens devido a ventos superiores a 25m/s	97
Figura 78 - Endoscopia seguida de substituição do rolamento veio alta velocidade	99
Figura 79 - Gráfico análise de óleos aerogerador nº7 em ppm.....	99
Figura 80 - Gráfico de amplitudes térmicas mensais.....	100
Figura 81 - Gráfico de paragens devido a ventos superiores a 25m/s	100
Figura 82 - Gráfico análise de óleos aerogerador nº8 em ppm.....	102
Figura 83 - Gráfico de paragens devido a ventos superiores a 25m/s	102
Figura 84 - Gráfico de comparação dos valores dos contaminantes no óleo	103
Figura 85 - Características do rolamento 6344M veio de alta velocidade – entrada do gerador.....	106
Figura 86 – Espectro de vibrações do rolamento 6344M/C3, danificado na pista interna - gerado....	107
Figura 87 – Espectro de vibrações do rolamento 6344M/C3, danificado na pista interna - gerador ..	107
Figura 88 – Espectro de vibrações do rolamento 6344M/C3, danificado na pista interna - gerador ..	108
Figura 89 - Gráfico de comparação do desgaste da pista interna.....	109
Figura 90 - Gráfico de comparação de amplitudes de vibração no gerador (DE).....	110
Figura 91 – Organograma da mudança de paradigma da manutenção em aerogeradores na caixa multiplicadora	112
Figura 92 – Organograma da mudança de paradigma da manutenção em aerogeradores fora da caixa multiplicadora	113
Figura 93 – Esquema das 2 fases do trabalho experimental - Meroicinha.....	115
Figura 94 – Aerogerador nº3 em Meroicinha – Localização	116
Figura 95 – Características técnicas do rolamento skf 230/630	116
Figura 96 – Espectro de frequências do CMS – 12 Hz Freq. defeito da gaiola	117
Figura 97 – Simplificação do modelo e direções da recolha de dados da estrutura	118
Figura 98 – Localização dos sensores na 1ª plataforma – 10,6m.....	119
Figura 99 – Localização dos sensores na 2ª plataforma – 33,18 m.....	119
Figura 100 – Localização dos sensores na 3ª plataforma – 56,9m.....	120
Figura 101 – Valores de alarme no aerogerador nº3 – Níveis globais de vibração	120
Figura 102 – Amostragem de duas horas de velocidade e direção do vento	121
Figura 103 – Acesso ao dados espectrais dos componentes mecânicos BKV do CMS.....	122
Figura 104 – Espectro de frequências do CMS – Amplitudes $F_{funcionamneto}$ e $TMF_{1^o \text{ e } 2^o \text{ estágio}}$	122
Figura 105 – Espectro (power density) dos sensores dos vários pontos da torre	123
Figura 106 – Espectro de frequências do CMS - Amplitudes $F_{funcionamneto}$ e $TMF_{1^o \text{ e } 2^o \text{ estágio}}$	123
Figura 107 – Espectro (power density) dos sensores dos vários pontos da torre – x1,x2 e x3.....	124
Figura 108 – Espectro (power density) dos sensores em todos os pontos 1,2 e 3.....	124
Figura 109 – Espectro do 2º estágio engrenamento para vento de 8m/s.....	125
Figura 110 – Espectro do 2º estágio engrenamento para vento de 9,5 m/s.....	125
Figura 111 – Espectro (power density) dos sensores em todos os pontos x1,x2 e x3.....	126
Figura 112 – Espectro (power density) sensor x3 para dias diferentes mas com velocidade vento igual	127
Figura 113 – Espectro (power density) sensor x2 para dias diferentes mas com velocidade vento igual	127
Figura 114 – Modos de vibração e frequências naturais da estrutura calculados pelo fabricante.....	128
Figura 115 – Registo das condições do ensaio durante a paragem 17 Agosto.....	129
Figura 116 – Registo das condições do ensaio durante a paragem - 31 Agosto.....	129

Figura 117 – Registo do sinal no tempo durante 81,92s – janela vermelha 20s após paragem	130
Figura 118 – Variação das componentes espectrais ao longo do tempo	130
Figura 119 – Acelerómetros colocados na caixa multiplicadora - perpendicular em relação ao veio, direção y.....	131
Figura 120 – Espectro comparativo direção Y estágio helicoidal 17 e 31 agosto.....	131
Figura 121 – Comparação das amplitudes de resposta do ponto x3 nos dias 17 e 31 Agosto.....	132
Figura 122 – Comparação das amplitudes de resposta do ponto Y3 nos dias 17 e 31 agosto.....	132
Figura 123 – Espectro de frequências após paragem na direção x	133
Figura 124 – Espectro de frequências após paragem na direção Y.....	133
Figura 125 – Espectro comparativo entre as direções x e y nos pontos 1 e 3	134
Figura 126 – Instalação de sensores baixa frequência na nacelle - direções x e y	134
Figura 127 – Comparação das amplitudes na direção x (nacelle) velocidades de vento diferentes .	135
Figura 128 – Comparação das amplitudes na direção y (nacelle) velocidades de vento diferentes .	135
Figura 129 – Comparação das amplitudes na direção x e y para 13 m/s.....	136
Figura 130 – Comparação das amplitudes na direção x e y para 13 m/s.....	137

ÍNDICE DE TABELAS

Tab. 1 – Informação técnica do gerador	37
Tab. 2 – Funções fundamentais dos sinal recolhido	60
Tab. 3 – Valores limite da análise de óleos lubrificantes para caixas multiplicadoras de aerogeradores [49].....	68
Tab. 4 - Registo das avarias do parque eólico da Freita	71
Tab. 5 - Registo das intervenções no aerogerador 1.....	72
Tab. 6 – Dados cinemáticos do rolamento do veio de alta velocidade à saída da caixa	73
Tab. 7 - Registo das avarias do Aerogerador nº2	80
Tab. 8 - Contaminantes químicos do óleo a 16 Janeiro 2009.....	81
Tab. 9 Tabela de registo de intervenções no Aerogerador nº3.....	84
Tab. 10 - Tabela de registo de intervenções no Aerogerador nº4.....	88
Tab. 11 - Tabela de registo de intervenções no aerogerador nº5	91
Tab. 12 - Tabela de registo de intervenções no Aerogerador nº6.....	94
Tab. 13 Tabela de registo de intervenções no Aerogerador nº7	98
Tab. 14 Tabela de registo de intervenções no Aerogerador nº8.....	101
Tab. 15 – Cálculo das frequências de defeitos dos rolamentos na entrada do gerador	106
Tab. 16 Cálculo frequência defeito na gaiola FTF	116
Tab. 17 – Cálculo das frequências de defeito dos rolamentos da caixa multiplicadora	117
Tab. 18 – Cálculo das frequências de defeito dos rolamentos da caixa multiplicadora veio de baixa velocidade	117
Tab. 19 – Cálculo das frequências de defeito das engrenagens da caixa multiplicadora	117
Tab. 20 – Cálculo das frequências de defeito dos rolamentos do gerador.....	118
Tab. 21 – Cálculo das frequências de defeitos elétricos.....	118
Tab. 22 – Registo das amplitudes para velocidades de vento diferentes.....	126
Tab. 23 – Primeiras frequências da resposta da estrutura	136
Tab. 24 – Comparação das frequências de resposta do ensaio e do fabricante.....	137

Simbologia

α	Ângulo de fase
β	Ângulo de passo
ω	Velocidade angular
ω_n	Frequência natural
ρ	Massa específica do ar
A	Seção plana transversal do rotor do aerogerador
Bd	Diâmetro da esfera
BPFO	Frequência de defeito na pista exterior
BPFI	Frequência de defeito na pista interior
BSF	Frequência de defeito na esfera ou rolo
C_p	Coefficiente de potência
CMS	Sistema de monitorização da condição
FDS	Fault detection system
FFT	Transformada rápida de Fourier
FTF	Frequência de defeito na gaiola
F(t)	Força excitadora (ex. Forças de desequilíbrio)
g	Aceleração
h	Altura
HSS	Veio de alta velocidade
IP	Índice de proteção
K	Número de planetários
LSS	Veio de baixa velocidade
M	Massa
N	Número de esferas ou rolos
Pd	Diâmetro do rolamento
PE	Parque eólico
RMS	“Root mean square”

RPM	Rotação por minuto
SCADA	Supervisory control and data acquisition
T	Período do sinal vibratório
TMF	Frequência de engrenamento
t	Tempo
V	Velocidade

Introdução

1 – Notas Introdutórias

A energia eólica tem vindo a tornar-se uma das mais promissoras fontes de energias renováveis, as quais podem substituir os combustíveis fósseis, apresentando as vantagens de serem praticamente inesgotáveis e de terem um impacto ambiental muito baixo.

Em 2011, a potência eólica ligada à rede pública aumentou 375 MW, totalizando, no final desse ano, 4081 MW de potência instalada e distribuída por quase todo o território nacional continental. Estes números têm vindo a aumentar devido, principalmente, a compromissos assumidos por Portugal em termos internacionais, quer no que respeita ao cumprimento do Protocolo de Quioto¹, quer no que se refere à Diretiva 2001/77/CE da União Europeia². No âmbito desta Diretiva, Portugal comprometeu-se a que, no ano de 2010, 39% da energia elétrica consumida no nosso país teria origem em fontes renováveis [1].

A motivação da presente investigação surge após a queda de alguns aerogeradores e a falha precoce de caixas multiplicadoras dos mesmos, tendo como consequência longas paragens e avultados custos, não só inerentes à falta de produção, mas também relacionados com o facto de este ser o elemento mais dispendioso no conjunto.

Deste modo, pretendemos mostrar a importância da análise de vibrações como ferramenta para uma melhoria da manutenção em aerogeradores, uma vez que acreditamos que permitirá um planeamento mais adequado para a implementação de manutenção preventiva condicionada, reduzindo tempos de paragem inesperada e as perdas de produção de energia.

Mais ainda, o nosso estudo vem no sentido de otimizar a manutenção, eliminando falhas precoces, através do conhecimento profundo das principais causas que estão na origem dessas falhas e da respetiva criação de um sistema de alarmes, baseados na realidade nacional³.

Nos últimos anos, temos vindo a assistir a um aumento da implementação de parques eólicos. Dada a conjuntura atual, é de supor que esse número continuará a crescer, mas mais lentamente, pelo

¹ Tratado internacional de compromissos para a redução da emissão dos gases com efeito de estufa.

² Relativa à promoção da eletricidade produzida a partir de fontes de energia renováveis no mercado interno da eletricidade

³ Referimo-nos às variações térmicas a que estamos sujeitos e à morfologia do terreno.

menos nos próximos anos. Além disso, há que assegurar a manutenção dos parques que já operam no nosso país nas melhores condições.

O estudo assenta na análise de vibrações referentes a diversos pontos de leitura na estrutura (torre) e nos vários componentes mecânicos do aerogerador. De forma a ser possível relacionar as vibrações da torre com as vibrações dos componentes mecânicos, foram instalados sensores na torre com o objetivo do conhecimento das características dinâmicas da mesma.

Para se proceder à instalação desses sensores e à respetiva ligação, foi necessário um acompanhamento do fabricante (Vestas) e estiveram, naturalmente, envolvidos custos inerentes a este processo, os quais foram suportados pela empresa Iberwind, que, desde logo, acolheu a nossa investigação.

A análise de vibrações vem no sentido de ajudar a conhecer o estado de condição do aerogerador, sendo um dos indicadores mais precisos na identificação da fonte perturbadora. O seu diagnóstico requer não só a utilização de equipamento adequado, bem como o conhecimento de uma extensa bibliografia e a posse de grande experiência na área.

Atualmente, os valores definidos para estabelecer alarmes de vibração em aerogeradores foram criados com base num vasto parque eólico internacional, mas a realidade nacional apresenta características muito próprias. Referimo-nos, em particular, à morfologia e às amplitudes térmicas, o que se traduz em falsos alarmes, situação que nos alertou para a necessidade de redefinir esses valores para levar a bom termo o nosso trabalho de investigação.

Para que seja possível essa nova parametrização de alarmes, será realizado um levantamento fotográfico de todos os componentes substituídos nos 29 aerogeradores em estudo, para ser alvo de comparação com o registo das suas vibrações.

Neste contexto, será feita uma descrição dos componentes de um aerogerador e dos respetivos defeitos como causas das várias vibrações.

Para a realização de medições de vibrações num aerogerador, é necessária a instalação permanente de sensores, conhecer as características da máquina, as suas condições de funcionamento, ou seja, a carga, a velocidade de rotação e a gama de frequências de interesse.

Relativamente à estrutura da presente dissertação, esta encontra-se organizada em cinco capítulos, que passamos a descrever sumariamente:

No capítulo 2, faremos uma primeira abordagem à energia eólica e descreveremos os equipamentos presentes em parques eólicos, destacando em particular os aerogeradores. Serão abordadas as avarias típicas de aerogeradores e uma breve descrição das operações de manutenção nos mesmos.

No capítulo 3, identificaremos as tecnologias de medição de defeitos em aerogeradores e serão apresentados os sistemas de monitorização.

No capítulo 4, serão apresentados e comparados dois casos de estudo – o parque eólico da Freita e o da Lousã (Nordex) onde consecutivamente são substituídos rolamentos e até mesmo caixas multiplicadoras num curto intervalo de tempo, sendo constituídos por 8 e 20 respetivamente. – e apresentaremos um novo modelo de manutenção aplicado em aerogeradores baseado na análise dos resultados.

No capítulo 5, trataremos de um caso de estudo – o aerogerador da marca Vestas localizado no parque eólico de Meroicinha, Terras de Bouro, Vila Real – que interliga as vibrações sentidas na torre com os principais componentes mecânicos, através de sensores de baixa frequência colocados nas três secções da torre, com a resposta dos acelerómetros colocados na chumaceira principal e na caixa multiplicadora.

Por último apresentam-se as conclusões, sendo também indicadas algumas sugestões para trabalhos futuros.

1.1 - Motivação

Numa altura em que a energia eólica se encontra em enorme expansão em Portugal, assiste-se a uma tendência para o aumento da implementação de novos parques eólicos. Neste contexto, em que os parques eólicos são compostos por aerogeradores e estes apresentam um grande número de componentes sujeitos a desgaste, torna-se necessário este estudo no sentido de melhorar planos de manutenção.

A construção de um parque eólico pode custar entre 1 a 1,5 milhões de euros por cada MW instalado, sendo que a potência média de cada aerogerador é de 2MW. Concluída a construção, todos os esforços se centram na manutenção dos mesmos.

Não serão operações de manutenção rotineiras visto que os componentes mecânicos operam a 80 m metros de altura. Perante esta estrutura muito particular, as informações provenientes das recolhas de vibrações poderão não ser tão fiáveis como esperado, devido às influências do vento.

Conhecer estes dados permite replanificar a manutenção evitando que os componentes se degradem, arrastando outros para o mesmo fim, o que se traduz em menos paragens, logo maior produção de energia.

Através da análise de vibrações é possível fazer um diagnóstico detalhado e profundo sobre qual o componente dentro do equipamento que está com defeito.

Poder planear com o conhecimento real das condições de funcionamento do aerogerador, traduz-se em grandes reduções de custos.

Deve ser realçado o facto dos parques eólicos nacionais apresentarem uma estimativa de duração de vinte anos, mas as empresas fabricantes oferecem garantia de manutenção apenas de metade desse tempo. Altura ideal para repensar na manutenção que está a ser realizada, pois passada essa garantia, as empresas detentoras de parques eólicos, necessitam de arranjar ferramentas de diagnóstico precoce como a análise de vibrações e seus valores de alarme, auxiliando no planeamento da manutenção preventiva condicionada.

Uma das principais falhas situa-se nas caixas multiplicadoras, estas desde da sua criação têm apresentado elevadas taxas de insucesso [2]. Os primeiros projetos de caixa de velocidades de aerogeradores apresentavam inúmeros problemas, desde de erros de projeto, à subestimação das cargas operacionais e a fraca integração no sistema. Esses problemas permitiram uma aprendizagem

durante as duas últimas décadas, entretanto os fabricantes de aerogeradores, engrenagens, rolamentos, consultores, engenheiros, especialistas de lubrificação têm trabalhado em conjunto a fim de se obter melhoramentos, nomeadamente na previsão de cargas, projeto mais eficiente e maior tempo de operação [3]. Esta colaboração resultou numa norma⁴ internacional de desenho de caixas multiplicadoras. Apesar de tudo, as caixas multiplicadoras estão muito longe de atingir os seus objetivos de projeto onde se prevê a duração média de 20 anos [4].

Devido ao facto das caixas multiplicadoras serem um dos componentes mais dispendiosos do aerogerador, esta taxa de falhas superior ao esperado têm como consequência o aumento significativo do custo da energia eólica.

Os fabricantes de aerogeradores protegem-se aumentando o preço de venda, para cobrir o risco de garantia que decorre da possibilidade de falhas prematuras de caixas multiplicadoras. Os proprietários de parques eólicos vêm com grande preocupação os problemas que podem aparecer após a garantia expirar [5]. Para ajudar a reduzir esse custo foram analisados estes dois parques, com o objetivo de identificar as principais causas de falha prematura, alertando para eventuais erros de projeto e modificando os existentes planos de manutenção.

1.2 - Objetivos

A presente dissertação tem o objetivo geral de contribuir para a mudança de paradigma relativo à manutenção em aerogeradores, num formato original, através da aplicação de técnicas de manutenção condicionada, de que são exemplo a análise de vibrações, a análise de óleos e as endoscopias. Quanto aos seus objetivos específicos, pretende desenvolver metodologias de manutenção, que permitam utilizar a manutenção preventiva condicionada da melhor forma possível. Para o efeito, socorrer-nos-emos do levantamento exaustivo de todas as avarias detetadas através do recurso às ferramentas acima referidas, o que permitirá a construção de um histórico, que será utilizado para o ajuste dos valores de alarme, traduzindo-se em ações imediatas de manutenção.

No que se refere ao registo das vibrações estruturais na torre do aerogerador objeto de estudo e localizado em Meroicinha, o nosso objetivo consistirá em quantificar as frequências naturais. Desta forma, será possível caracterizar o comportamento da torre e, assim, identificar se a sua resposta dinâmica afeta o sistema mecânico (*nacelle*) e se, de alguma forma, as avarias precoces que estão a acontecer, derivam da resposta ressonante da torre. Pretende-se também relacionar o comportamento dinâmico da torre com as vibrações detetadas pelo sistema de monitorização on line (CMS).

⁴ ISO, 81400-4, (2005), "Design and specification of gearboxes", in Wind Turbines

1.3 – Estado da Arte

Num país dependente do petróleo como é o caso de Portugal, temos vindo a assistir a um aumento da produção eólica no sentido de minorar essa dependência.

A utilização de aerogeradores permite tirar partido da energia contida na deslocação do ar das zonas de alta pressão para as zonas de baixa pressão, estas correntes de ar permitem a rotação das pás que por sua vez acionam um gerador de corrente elétrica.

Através da figura seguinte é possível observar a evolução da potência instalada em Portugal Continental.

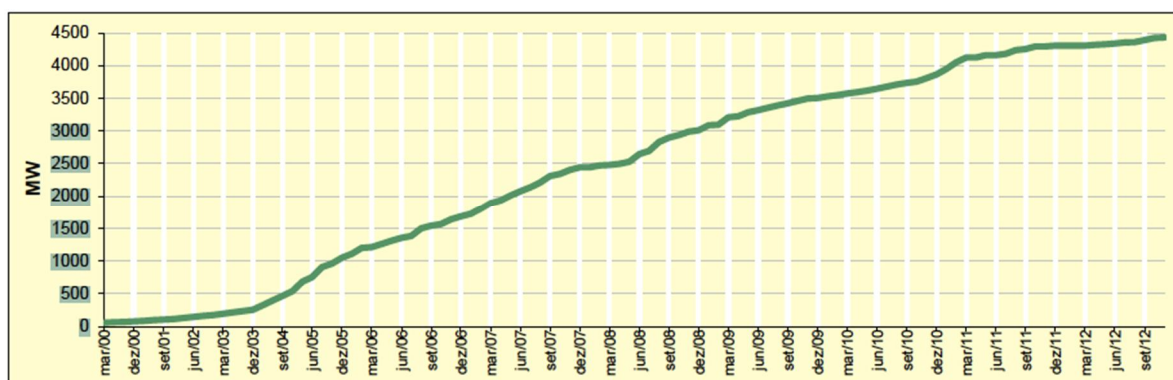


Figura 1 – Evolução da potência instalada em Portugal Continental (MW) [1]

Os componentes mecânicos fundamentais de um aerogerador são, o rotor que é o responsável pelo aproveitamento da energia cinética do vento e acionamento do gerador, a *nacelle* (casa das máquinas), caixa multiplicadora, mecanismos de regulação e a torre.

A tendência atual remete para a utilização de aerogeradores de grandes potências e instalados em locais remotos, estas condições impõem grandes desafios às equipas de operação e manutenção.

Com o aumento do parque eólico nacional urge a necessidade de reduzir os custos de operação e manutenção, tornando a fiabilidade dos sistemas maior, evitando paragens inesperadas e programando as operações de manutenção para momentos de menor produção.

O melhoramento de modelos de gestão da manutenção em parques eólicos carece de estudos aprofundados em áreas como as vibrações e análise de óleos. A utilização do histórico de manutenção irá permitir correlacionar dados de vibrações, com análise de óleos, amplitudes térmicas e paragens forçadas do aerogerador, com o objetivo de traçar curvas de tendência e poder planear o melhor momento da intervenção nos componentes mecânicos.

Por outro lado, o conhecimento da resposta dinâmica da torre pode ser encarada, como um forte contributo em termos de manutenção, permitindo o acompanhamento da evolução das suas amplitudes ao longo da sua vida útil.

1.4 - Metodologia

Começaremos o nosso trabalho de investigação com a realização de um inquérito para se compreender a forma como é realizada a manutenção em parques eólicos nacionais.

Depois de analisados os resultados, pretendemos que a nossa investigação decorra exclusivamente nos parques onde haja uma maior incidência de taxas de avarias.

Selecionaremos os sensores de baixa frequência, por serem adequados para se proceder à recolha de dados provenientes da torre; depois, faremos os cálculos necessários para determinar a localização dos sensores, a que se seguirá a sua instalação.

Teremos ainda o cuidado de sincronizar os dados provenientes da torre com os dados do sistema de monitorização dos componentes mecânicos do aerogerador. E procuraremos perceber se as vibrações da torre influenciarão a resposta dos sistemas mecânicos e, em caso afirmativo, compreender de que forma isso acontece.

Para se obterem novos valores de alarme do sistema de monitorização, teremos o cuidado de proceder ao levantamento de cada avaria e de correlacionar toda a informação disponível (os valores das vibrações, os níveis de contaminação do óleo, as amplitudes térmicas e as paragens devido a ventos superiores a 25 m/s).

1.5 - Enquadramento teórico da análise de vibrações na manutenção condicionada

A análise de vibrações é a técnica dominante na manutenção condicionada, a qual permite determinar a condição dos equipamentos, tendo em conta o facto de que os problemas de uma máquina se manifestam através de vibrações ou da alteração da vibração característica [6].

A manutenção condicionada é uma das formas de organização, que tem o objetivo de obter uma melhor racionalização de meios humanos e técnicos, de forma a reduzir os custos diretos e indiretos relacionados com a manutenção. A análise de vibrações, enquanto ferramenta da manutenção condicionada, permite uma maior disponibilidade e eficiência dos equipamentos, entre eles, os produtivos, desempenhando um papel fundamental em termos de competitividade da empresa produtora de energia.

Compreende-se o quão importante é implementar uma política de Manutenção eficaz numa empresa, atendendo ao impacto que a Manutenção tem sobre os custos finais de produção de energia

Assim sendo, o recurso a planos de manutenção condicionada e a implementação de técnicas de monitorização de condição estão ligadas a filosofias de manutenção mais sofisticadas. Implicam, portanto, uma equipa de manutenção mais qualificada, um maior nível tecnológico e, necessariamente, custos mais elevados.

No entanto, não podemos ignorar as vantagens apresentadas pela adoção deste sistema de manutenção, como o diagnóstico antecipado, que permite o aprovisionamento de peças de reserva em tempo útil; o controlo efetivo dos *stocks*, reduzindo o valor das existências em armazém; a possibilidade de planear os trabalhos de manutenção de modo a fazer coincidir as intervenções com

os tempos não produtivos; a previsão da degradação de um componente, que permite reduzir a probabilidade de ocorrências de avarias intempestivas; ou ainda o facto de as decisões sobre as intervenções assentarem na análise de dados concretos e não em argumentos subjetivos. Assim sendo, no final, temos um aumento da fiabilidade e da vida útil dos equipamentos.

Antes, porém, de iniciarmos uma análise de vibrações, é necessário conhecer o equipamento que se pretende medir e as circunstâncias em que está a operar, assim como a frequência de funcionamento, o tipo de rolamentos, as frequências das engrenagens, ou seja, é necessário conhecer todo o histórico e as características do equipamento em causa [7].

Conhecer o histórico de um equipamento torna-se, deste modo, essencial para identificar possíveis defeitos que se manifestam pela subida da amplitude dos valores globais de vibração.

A propósito de vibrações, as principais fontes que estão na sua origem são os desequilíbrios, os desalinhamentos, as tolerâncias de montagem, os desenhos dos rolamentos e a sua carga, a lubrificação deficiente e o tipo de montagem do equipamento [7, 8].

Tendo como principais fontes de vibrações os desequilíbrios, desalinhamentos, tolerâncias de montagem, desenhos dos rolamentos e sua carga, lubrificação deficiente, tipo de montagem do equipamento. Originados por alterações nas condições normais de funcionamento do equipamento, como, por exemplo, a velocidade de rotação, a carga, a temperatura e a pressão [5,6].

1.6 – Revisão bibliográfica

A consciência crescente das alterações climáticas ajudou a perceber a importância da energia renovável. Segundo a International Energy Agency, a necessidade de energia em 2030 será 60% superior à atual e, destes 60%, dois terços serão da China e Índia, entre outras economias emergentes [9].

A indústria eólica, em particular, tem visto um aumento insaciável, como resultado, urge a necessidade de aerogeradores fiáveis. Infelizmente, as falhas recorrentes de caixas multiplicadoras têm caracterizado a indústria e têm impedido os mesmos de atingir sua vida útil projetada para aproximadamente 20 anos.

A substituição da caixa multiplicadora e lubrificação contribuem em 38% do custo total da manutenção, situação esta que exige a implementação de novas técnicas de simulação a ser integradas no processo de projeto da caixa multiplicadora para que este componente possa cumprir o seu tempo de vida inicialmente previsto. [10]

Segundo (Oyague, 2009: 13-19;) a caixa multiplicadora é o componente de maior complexidade mecânica no sistema de transmissão e é o principal responsável pelos tempos de inatividade operacional. Várias hipóteses foram levantadas na tentativa de compreender as falhas precoces de caixas multiplicadoras, entre elas estará a possibilidade de não serem consideradas as elevadas cargas ainda na fase de projeto e da conceção dos componentes do sistema de transmissão. Há também a possibilidade de que as cargas e os efeitos dinâmicos torsionais sejam transferidos para os

componentes do sistema de transmissão. Por último, é possível que a fiabilidade dos rolamentos possa variar muito entre fornecedores.

Outra característica importante na falha de caixas multiplicadoras, é que elas ocorrem em aerogeradores de vários tamanhos e que apresentam as mesmas configurações interiores.

Uma empresa de aerogeradores pode ter mais do que um fornecedor de caixas multiplicadoras, e no interior das caixas pode haver diferentes marcas de rolamentos, esse é uma fator que dificulta o estudo e compreensão do comportamento das falhas precoces destes componentes [10].

Oyague, utilizou um aerogerador com potência de 750 KW, rotor com 48m de diâmetro e uma torre de 55m de altura, com o objetivo de validar modelos com dados experimentais e teóricos concluindo que os dados teóricos apresentados nos diversos modelos tinham uma disparidade inferior ou igual a 10% para os coeficientes de rigidez e não era superior a 20% para os coeficientes de amortecimento da caixa. Estes dados são de extrema importância, porque os valores teóricos podem ser calculados utilizando as dimensões físicas da caixa multiplicadora e a resposta obtida não difere muito relativamente à resposta verdadeira.

Assim, a resposta simulada não corresponde exatamente à resposta obtida a partir dos dados experimentais. Pode ser pensada uma alteração na rigidez com o objetivo de alterar a frequência da resposta obtida, visto que o efeito da folga entre dentes (*backlash*) tem uma influência sobre a rigidez global do sistema. Esta influência resulta numa mudança de frequência ou rigidez que é semelhante ao observado na resposta experimental, embora a correlação não seja tão forte. Além disso, devem ser estudadas todas as flexibilidades não torsionais, tais como o veio e os seus apoios, bem como a flexibilidade da base de apoio da caixa, que, também pode influenciar o desalinhamento e condições de carregamento dos componentes do sistema de transmissão.

Verbruggen, efetuou um estudo bastante detalhado sobre os métodos mais usados de análise de avarias em aerogeradores, os três objetivos do projeto foram a elaboração de um levantamento das técnicas de monitorização do estado de condição disponíveis e selecionar um conjunto que apresente um valor acrescentado para turbinas eólicas, outro objetivo passou por instrumentar um aerogerador e demonstrar a validade das técnicas de monitorização de condição que podem ser usadas, estas baseiam-se em análise de vibrações, óleo, termografia, condições físicas dos materiais, acústica, efeitos elétricos, parâmetros do processo, inspeção visual, desempenho do sistema, sinais de sensores e tensão mecânica.

Por último a identificação de áreas de maior desenvolvimento, por exemplo, novos sensores, algoritmos de análise de dados ou integração dos sistemas de controlo na turbina. [11]

A análise de vibrações em aerogeradores é uma ferramenta amplamente utilizada na manutenção condicionada e no controlo de condição, é particularmente útil para uma grande parte de problemas encontrados em caixas multiplicadoras. Várias pesquisas apontam no sentido de ser necessário implementar medidas de monitorização CMS e FDS⁵ (Hameed e outros, 2009: 37-38), estas são fundamentais para detetar falhas atempadamente, a aplicação destas técnicas implica grande

⁵ CMS – Condition monitoring system
FDS – Fault detection system

investimento inicial, mas estes custos serão rapidamente amortizados.

De acordo com o estudo realizado (Link e outros, 2011: 61-70) constata-se que a chumaceira principal permite pequenos deslocamentos axiais do eixo principal, este fenómeno foi observado em testes de campo. É possível que estes deslocamentos possam causar danos no interior da caixa multiplicadora, também ao nível do torque suspeita-se que nas altas frequências a inércia da caixa multiplicadora provoque um movimento entre o veio principal e a caixa, podendo provocar alterações internas na mesma.

Características de diferentes CMS foram estudados por (Hameed Z, Ahn SH, Cho YM, 2010: 14-16) destacando-se problemas na instalação do CMS, concluiu-se que, para um bom funcionamento do sistema este terá de ser visto como um todo, e nunca pontos particulares de recolha, visto que a estrutura CMS é bastante complexa [14].

Para se fazer um sistema fiável e robusto, tem de existir a compreensão completa das operações do aerogerador e a experiência em programação, estes dois pontos são essenciais, sem os quais os objetivos do CMS não serão atingidos.

Uma grande preocupação demonstrada por (Molinari e outros, 2010: 9-10) para a instalação de parques eólicos é a fiabilidade das estruturas de suporte a longo prazo.

Numa torre de aço uma combinação de vórtices e rajadas podem aumentar o fenómeno de fadiga na base. Para identificar as condições críticas para o desenvolvimento deste fenómeno, foi estudada uma turbina com diâmetro do rotor de 13 m, potência nominal de 11kW e a torre de 18 m de aço. A torre foi instrumentada com 15 acelerómetros, o primeiro registo foi com a ausência de vento significativo, seguindo-se a resposta espectral após a excitação do vento, permitindo registar as respostas tanto em operação, bem como, com rotor em repouso. O resultado da experiência sugere que a vulnerabilidade à fadiga deste modelo de turbina é muito sensível ao seu comportamento modal, este, por sua vez, dependente da rigidez das fundações.

Neste modelo ensaiado observou-se que a amplitude da vibração depende de muitos fatores ligados entre si, como as ressonâncias da estrutura, a excitação produzida pelo rotor e ainda a interferência dos vórtices.

O CART3⁶ foi utilizado por (Osgood e outros, 2010) para testar novos modelos de controle em aerogeradores, com o objetivo de se reduzir os efeitos de fortes ventos e os mesmos poderem danificar o aerogerador. Foi utilizado um modelo de simulação dinâmica modal experimental, onde o aerogerador em estado estacionário é excitado por agitadores hidráulicos ligados por cabos, o objetivo deste ensaio foi comparar a análise modal operacional onde a mesma estrutura é submetida à excitação mas sem os agitadores. Através deste estudo foi possível revelar 15 modos abaixo dos 10Hz e os testes de excitação da estrutura lateralmente parecem ser os melhores. Os modos identificados pela análise modal operacional apresentaram resultados muito fiáveis, mas as amplitudes registadas indicam que houve uma excitação insuficiente das baixas frequências. Normalmente a excitação proveniente do vento fornece maior excitação das baixas frequências comparativamente com o sistema hidráulico.

⁶ Three-bladed Controls Advanced Research Turbine

Segundo (Bir e outros, 2007: 25-28) foi compreendida pela indústria a necessidade de estimar as propriedades reais estruturais de torres e pás de aerogeradores, para esse efeito foi desenvolvido um modelo de elementos finitos “FAST”, este permite modelar a torre através dos Bmodes, este modelo demonstrou resultados bastante fiáveis para o primeiro modo de vibração.

O objetivo do projeto de (Paulsen e outros, 2010: 1-12) foi aplicar um sistema personalizado de pontos (fotogrametria) num aerogerador em funcionamento e com uma paragem de emergência. Os dados foram adquiridos a 100 Hz em 7 segundos, para mais de 50 alvos (pontos). Os resultados forneceram uma capacidade única para medições em objetos extremamente grandes e componentes rotativos, com largura de banda e precisão suficiente para capturar e quantificar deslocamentos 3D, formas de flexão, torção das pás e torre.

Li, investigou o efeito da flexibilidade sobre a distribuição de cargas nos dentes da engrenagem, concluindo que a flexibilidade é um atributo importante no comportamento da engrenagem [19].

Relativamente às partes rotativas lubrificadas, a qualidade dos óleos é preponderante e, normalmente, verificada com regularidade. O método de análise de óleo tem assim dois objetivos, verificar a sua qualidade e, em simultâneo, a boa saúde das partes mecânicas lubrificadas.

Normalmente, este método é feito off-line através da recolha de amostras. Existem, no entanto, várias aplicações onde são usados sensores para determinar o grau de contaminação do óleo e, a consequente necessidade de mudança do filtro ou determinação de existências de peças com desgaste excessivo [20].

Através do programa JOULE III, financiado pela União Europeia, foi desenvolvida uma metodologia de avaliação e deteção de falhas de maior preocupação, nas pás do rotor, nos componentes mecânicos e torre. O método analisa e monitoriza as emissões acústicas quando a turbina está em operação. O algoritmo baseia-se no reconhecimento de padrões dos sinais obtidos para avaliação automática da integridade das estruturas. Nas conclusões, prevê-se que este estudo possa vir a dar origem a uma norma europeia a ser utilizada por investigadores, investidores e companhias de seguro, no cálculo de viabilidade e fiabilidade de parques eólicos [21].

Rodrigues (2010: 14-27) realizou um estudo sobre a proteção dos parques eólicos contra os efeitos diretos das DEA⁷. Apresentou uma revisão sobre o método de análise de risco de danos causados por DEA proposto pela normalização internacional IEC 62305. Desenvolveu um novo programa de computador em Visual Basic, o LPS 2008, que corre sobre o AutoCAD, efetua a análise de risco de danos de uma qualquer estrutura ou conjunto de estruturas baseado na IEC 62305 e permite ainda a simulação em 3D do RSM. O RSM permite identificar os pontos vulneráveis de uma estrutura em função do nível de proteção escolhido.

⁷ (DEA) Descarga Elétrica Atmosférica

Capítulo 2

Aerogeradores

2 - Aerogeradores

2.1 – O seu princípio de funcionamento

Como é do conhecimento geral, a energia eólica tem na sua origem a energia solar. É uma forma de energia cinética produzida pelo aquecimento diferenciado das camadas de ar, originando uma variação da massa específica e gradientes de pressão. Além disso, também é influenciada pelo movimento de rotação da Terra sobre o seu eixo e depende significativamente de influências naturais. As pás dos aerogeradores são dispositivos aerodinâmicos com perfis especialmente desenvolvidos, que funcionam segundo o princípio físico da sustentação. Um aerogerador, por sua vez, é um dispositivo destinado a converter a energia cinética proveniente do vento em energia elétrica, por acionamento de um gerador elétrico [23].

A velocidade do vento e o diâmetro do rotor são parâmetros fundamentais na quantidade de energia produzida. No entanto, a instalação das turbinas eólicas tem interesse somente quando a velocidade do vento, na zona em que serão instaladas, atinja a velocidade de pelo menos 3.6 m/s, num regime o mais permanente e regular possível e sem grande turbulência [24].

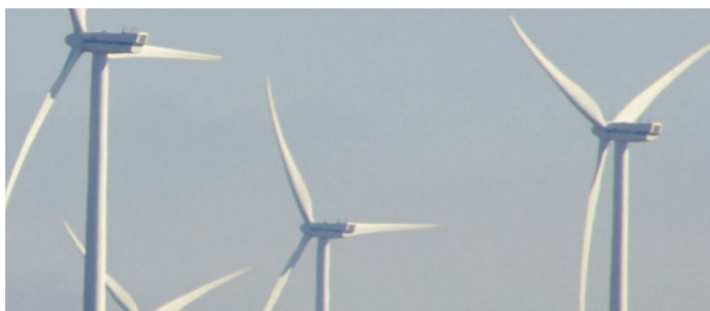


Figura 2 - Parque eólico com aerogeradores Vestas

Atualmente, a maioria dos aerogeradores que se encontram instalados em Portugal são equipados com caixas multiplicadoras, permitindo ao veio proveniente do rotor rodar a baixas velocidades, com velocidades de vento entre 5m/s e 25m/s, no máximo.

O processo de conversão de energia de um aerogerador é descrito pela sua curva característica, conhecida como curva de potência. As curvas de potência, independentemente do fabricante, não apresentam grandes diferenças na sua forma. Na figura 3, podemos ver o exemplo da curva de potência de um aerogerador com potência nominal de 2000 kW.

Não existe produção para velocidades do vento inferiores à *cut-in speed* (aprox. 3 m/s). A produção aumenta abruptamente entre a velocidade *cut-in* e *rated speed* (aprox. 13-15 m/s), sendo que, a partir dos 15 m/s, atinge uma produção constante muito próxima da produção nominal. Se a produção atingir uma velocidade superior a 25 m/s, deverá parar por razões de segurança.

O valor da potência nominal da turbina P_m é uma referência da capacidade de produção do aerogerador. A rápida subida da curva característica da baixa velocidade do vento, é explicada pela equação que determina a relação entre as duas variáveis. A potência máxima, $P(W)$, é proporcional ao cubo da velocidade do vento, sendo dada pela seguinte equação [23]:

$$P_m = \frac{1}{2} \cdot A \cdot V^3 \cdot \rho \cdot C_p \quad (2.1)$$

onde $A(m^2)$ é a secção plana transversal do rotor do aerogerador e ρ a massa específica do ar ($1.225 kg/m^3$) em condições de pressão e temperatura normais, V é a velocidade do vento (m/s) e C_p é o coeficiente de potência.

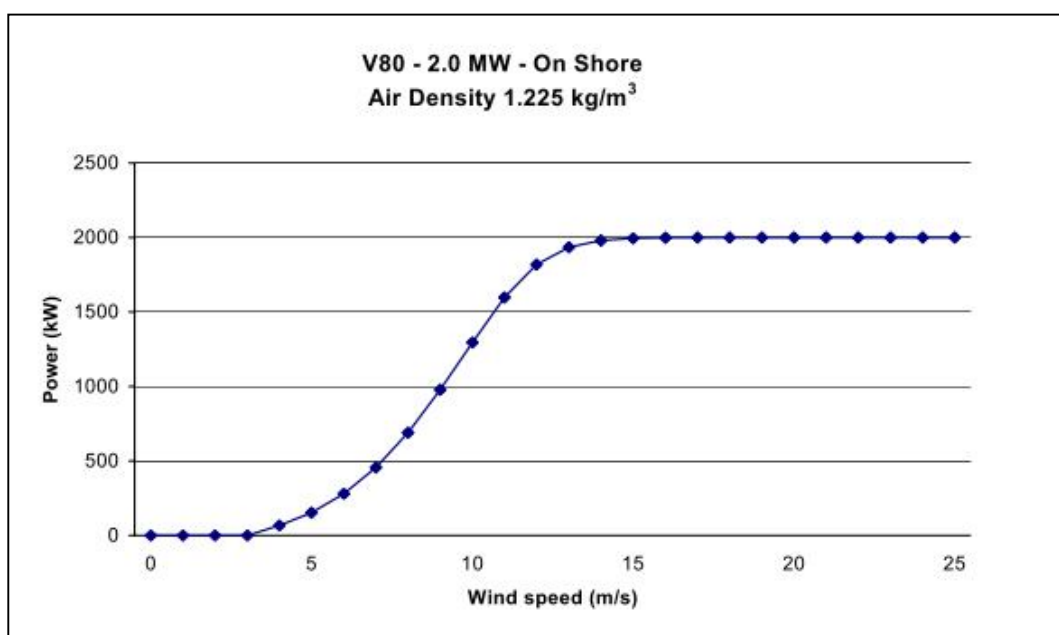


Figura 3 - Curva de potência do aerogerador Vestas V80-2MW [20]

O controlo de potência de um aerogerador prende-se com o facto de haver a necessidade de limitar a potência fornecida pela turbina eólica para valores acima da velocidade nominal do vento.

Esta regulação pode ser feita por meios passivos, isto é, desenhando o perfil das pás, de modo a que entrem em perda aerodinâmica a partir de determinada velocidade do vento – *stall*; ou por meios ativos, ou seja, variando o passo das pás – *pitch*.

2.2 – Os principais componentes

Os principais componentes mecânicos de um aerogerador são o rotor que inclui as pás, que é o responsável pelo aproveitamento da energia cinética do vento; a chumaceira principal; a caixa multiplicadora, que promove o acionamento do gerador e a *nacelle*. Esta é uma espécie de casa das máquinas onde estão instalados todos os componentes mecânicos, os mecanismos de regulação da turbina e a torre que serve de apoio à *nacelle* (fig. 4).

O eixo principal transmite a energia para o gerador através da caixa de velocidades, a qual é composta, normalmente, por três estágios – um planetário e dois helicoidais. A caixa multiplicadora aumenta a relação para, aproximadamente, cem vezes no veio de alta velocidade, que, por sua vez, está acoplado ao gerador assíncrono.

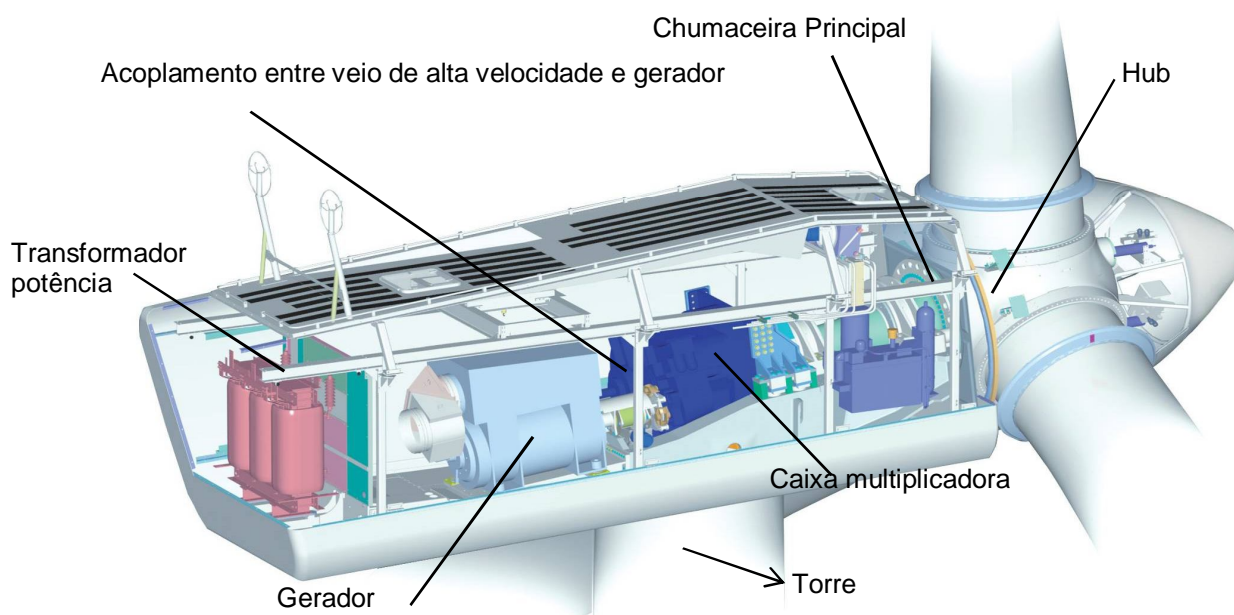


Figura 4 - Interior de uma *nacelle* com os respetivos equipamentos [25]

Todas as funções do aerogerador são monitorizadas e controladas por microprocessadores, instalados no interior da *nacelle*. As alterações no posicionamento das pás são ativadas por um sistema hidráulico, que permite uma rotação até 95°. Este sistema também fornece a pressão para o travão de emergência.

2.2.1 – O rotor

O rotor, em relação à superfície de ataque do vento incidente nas pás, é posicionado, normalmente, a montante (*upwind*) da torre, posição esta em que o vento ataca as pás pelo lado da frente.

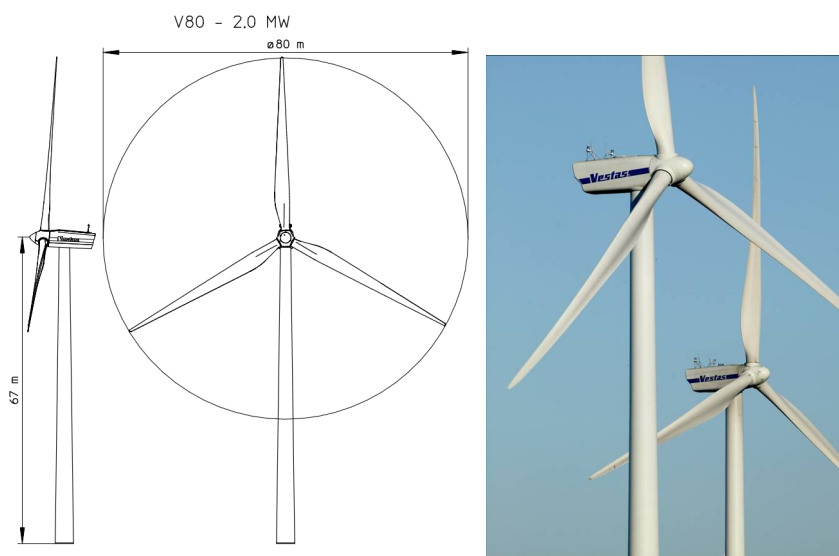


Figura 5 - Conjunto Rotor e torre – Vestas V80-2MW

O rotor será constituído pelo cubo com 3 pás, possui um diâmetro de 80 metros e apresenta uma velocidade variável entre as 9 e as 19 rotações por minuto. A rotação faz-se no sentido horário, com o ângulo (passo) das pás variável e uma área de varrimento de 5 027 m² [Anexo D-2].

Cada pá mede 39 metros de comprimento, 3,52 metros de largura no início e 0,48 metros na ponta, pesando um total 6 500 kg. Os materiais utilizados na sua construção são fibras de vidro reforçadas com epoxy [Anexo D-2] e a sua ligação ao cubo do rotor é assegurada por intermédio de parafusos de aço.



Figura 6 - Seção do interior de uma pá [26]



Figura 7 - Pás antes da montagem

É de referir ainda que a evolução técnica relacionada com os materiais utilizados tem implicado, nos últimos anos, um crescimento da dimensão dos rotores, o que significa que a potência das turbinas tem aumentado.

Para efeitos de sinalização diurna, algumas empresas fabricantes de aerogeradores optam por uma pintura diferenciada das pás, mas sempre de acordo com a regulamentação em vigor e também sujeita à aprovação do dono do parque eólico.

2.2.2 – A torre

A torre apresenta uma estrutura tubular cónica, em aço, com proteção anticorrosiva por galvanização, aplicação de primário à base de pó de zinco e acabamento com tinta à base de resina epoxídica. Este componente do aerogerador apresenta dimensões de 4 metros de diâmetro na base e 2,3 metros no topo; está dividido em três secções e a sua altura até ao cubo é de 67 metros. No seu interior, há um elevador, que percorre praticamente a sua altura total, na parte superior estão instalados, o rotor e a *nacelle* (casa da máquinas), que alojará o grupo gerador, a caixa de velocidades, o transformador do grupo, os conversores e os quadros de regulação e, na base, os quadros de potência à tensão de produção e de controlo do grupo.

No interior da torre, junto à base, ficarão também as celas de média tensão do posto de transformação e, na cabina, o transformador elevador, para ligação às celas de 15 kV do posto de corte [Anexo D-2].



Figura 8 - Vista de baixo do exterior e do interior da torre – Vestas V80-2MW

2.2.3 – A caixa multiplicadora

A caixa multiplicadora é a ponte de ligação entre a turbina e o gerador, através de acoplamento, com uma relação de multiplicação de 1:113,2 e com arrefecimento exterior do óleo de lubrificação. O fabricante da caixa da Vestas-V80 é Winergy (fig. 9), do tipo PEAB 4435, com um deslocamento do veio de 948 mm (horizontal) e com um comprimento total de 2 689 mm, atingindo um peso de 16 000 kg.

O sistema de lubrificação da caixa é assegurado através de uma bomba de óleo, do tipo Dani-tech GR45 SMT 16B-2.2 kW-690 V, com uma pressão máxima de 15 bar.



Figura 9 - Caixa multiplicadora Winergy – Vestas V80-2MW


O filtro de óleo é da marca Hydra Grene, do tipo DIN 24550, com filtragem de 25 μ m ABS. O filtro off-line é de 3 μ m.

Quando o óleo entra na caixa é aquecido por três resistências de 800W cada, e para arrefecer o óleo são necessários ventiladores de tamanho 502 x 620 mm, com diâmetro 456 mm [Anexo D-2].

2.2.4 – O gerador

O gerador é do tipo assíncrono, trifásico de 4 pólos, com conversão de frequência por ponte de tiristores e acoplamento através de caixa de velocidades à turbina, apresentando as seguintes características:

Fabricante	Leroy Somer
Tipo	FLSB 500 LB
Tensão nominal	690 V
Potência nominal	2000 kW
Frequência (após conversão)	50 Hz
Potência aparente ($\cos\phi = 0,96$)	2083 kVA
Velocidade de rotação	1680 a 2016 rpm
Classe de isolamento	F
Índice de proteção	IP 54

Fator de potência (regulável)	1,0 (0,98 cap. a 0,96 ind)
Arrefecimento	Ar forçado
Peso	5940 kg
Rolamento (DE NDE):	6330M C3
Pista interna	15 µm radial 10 µm axial
Fotografia	

Tab. 1 – Informação técnica do gerador

2.2.5 – A Nacelle

A função principal deste componente consiste em proteger os componentes mecânicos e elétricos dos fatores climáticos – a chuva, a neve, as poeiras, o sol, etc. A *nacelle* é constituída por uma estrutura em aço, com carenagem em fibra de vidro reforçada. Está apoiada sobre uma base móvel, que lhe permite a orientação adequada à direção do vento; é comandada por um sistema de controlo de posição e é acionada por motores elétricos, apresentando uma abertura central que permite o acesso a partir da torre.

Os sistemas de medida meteorológica, afetos aos sistemas de regulação, designadamente a cataventos e a anemómetros, estão equipados com dispositivos contra a formação de gelo, de forma a evitar avarias ou o mau funcionamento dos mesmos. Estes dispositivos estão instalados no seu exterior, podendo ser visitados através de uma abertura (claraboia) existente no telhado da *nacelle*.

Esta contém dezasseis secções montadas sobre amortecedores de vibração, ou seja, em sinoblocos. São da marca IKAS Novibra RA 800 EMB.

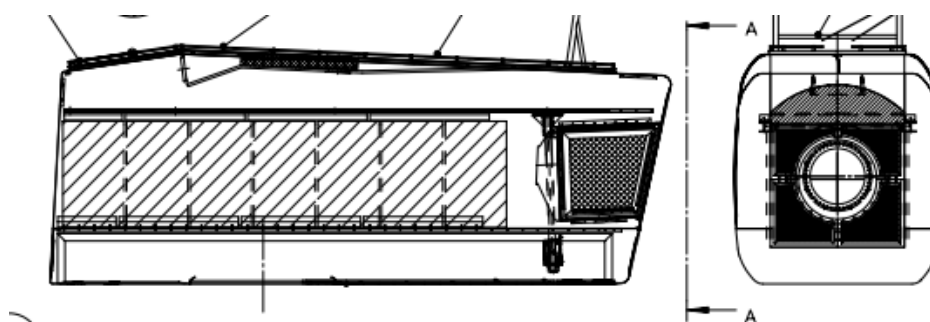


Figura 10 - Caixa da Nacelle

2.2.6 – Os sistemas de regulação

O sistema de regulação, para comando do ângulo das pás da turbina, é constituído por conjuntos de engrenagens acionadas por servomotores hidráulicos controlados por microprocessadores.

As pás podem ser colocadas em bandeira (0° com a direção do vento) para efeitos da travagem aerodinâmica do rotor.



Figura 11 - Cubo do rotor

2.2.7 – Os sistemas de travagem

A travagem do rotor é assegurada por dois sistemas – um é constituído por travão mecânico, de disco, montado no veio do grupo e o outro, de tipo aerodinâmico, através da variação do passo das pás até ao seu posicionamento em bandeira, reduzindo a velocidade do rotor. O sistema de travão de disco assegura a paragem final e o quando o rotor se encontra parado. Existe ainda um sistema de travagem que assegurará o bloqueio da *nacelle* em torno do seu eixo de rotação.

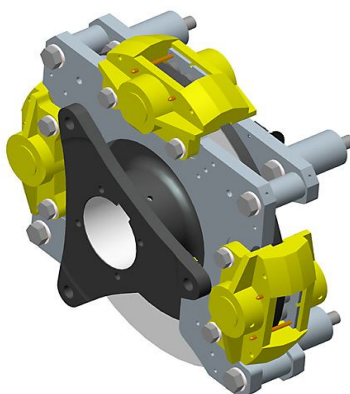


Figura 12 - Sistema de travagem de emergência

2.2.8 – Os sistemas de controlo da posição da *nacelle*

O sistema de orientação da *nacelle* é constituído por um conjunto de engrenagens acionadas por motores elétricos. A alimentação destes motores é feita a partir dos respetivos serviços auxiliares. Estes sistemas são supervisionados pelo autómato do grupo, que recebe informação dos sistemas de controlo de posição. Estes sistemas são constituídos por anemómetros e por sensores de posição e direção do vento, que lhes permitem orientar a *nacelle* e posicionar as pás adequadamente.

2.2.9 – A sinalização aérea

No topo da *nacelle* estão instaladas armaduras equipadas com lâmpadas de neon, ou halogéneo, em compartimento ótico reforçado, para sinalização à navegação aérea, diurna branca intermitente e noturna vermelha fixa (ou intermitente), de acordo com a regulamentação aeronáutica aplicável.

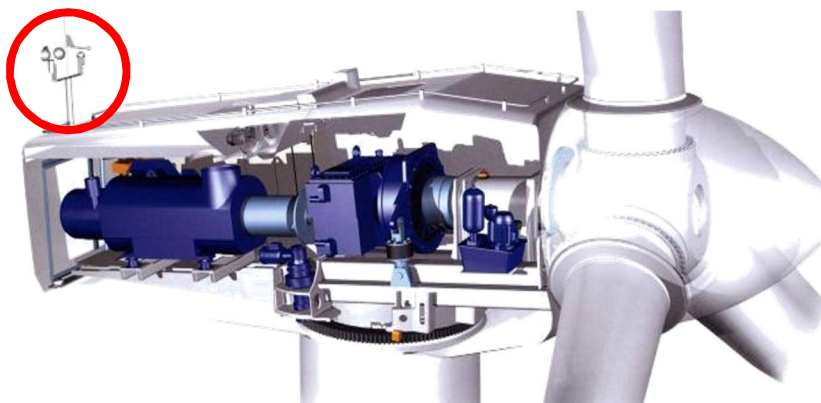


Figura 13 - Sistema de sinalização Aérea

2.2.10 – A proteção contra descargas atmosféricas

O sistema de captura de descargas é, normalmente, colocado na extremidade e nos bordos das pás da turbina. De seguida, as descargas são conduzidas por cabo, no interior das pás, até às respetivas flanges e destas para o veio principal, de onde serão descarregadas para a estrutura da cabina através de escovas. A partir desta será ligada por cabo à estrutura da torre, cujas secções estão interligadas entre si até à malha da rede de terras subterrâneas.

2.2.11 – O SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition)

Trata-se de um sistema de aquisição em tempo real da informação inerente à produção, à velocidade, à direção do vento e à temperatura na *nacelle* e na caixa multiplicadora (fig. 14).

O SCADA recebe toda a informação dos sistemas de controlo de posição, sendo utilizado em diversos aerogeradores com o objetivo de controlar remotamente vários parâmetros, como a orientação da

nacelle, o posicionamento das pás, as paragens programadas para manutenção (ou mesmo para controlar os ensaios, que decorreram na estrutura do aerogerador).

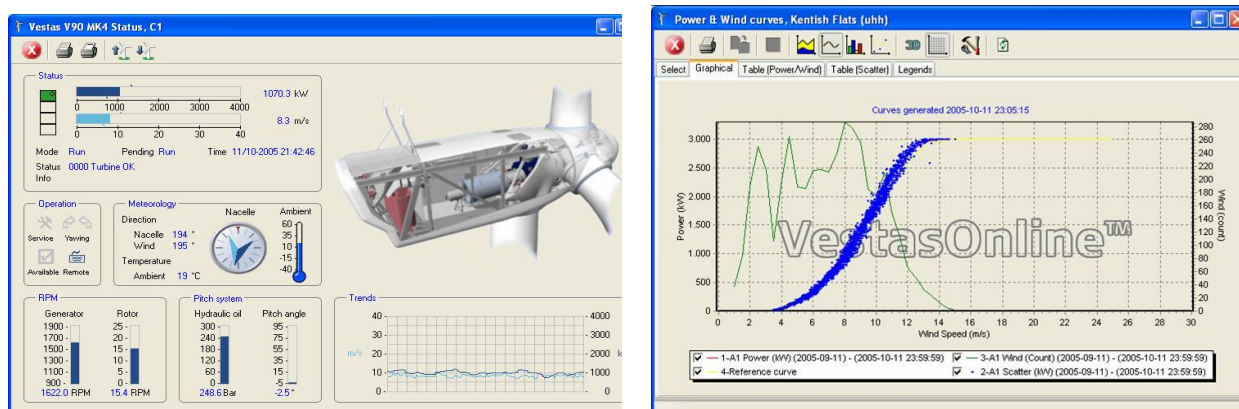


Figura 14 - Sistema de controlo de dados

2.2.12 – O CMS (Conditioning Monitoring System)

O CMS é um sistema de monitorização (*on-line*) em tempo real das vibrações existentes, permitindo conhecer o estado e as condições em que funcionam os componentes mecânicos, através da instalação de sensores permanentemente instalados em pontos específicos do aerogerador. Estes pontos são referentes aos componentes principais, designadamente a chumaceira principal, a caixa multiplicadora e o gerador.

Através do acesso *on-line*, é possível controlar os níveis globais de vibração, espectros e alarmes nos diversos pontos do aerogerador já descritos anteriormente.

A figura 15 mostra-nos um alarme de nível 3 na chumaceira principal (main bearing), o qual se encontra assinalado a amarelo. Estamos perante um grau de severidade, que obrigará à observação do defeito assim que houver disponibilidade por parte dos técnicos.



Figura 15 – Controlador de dados de vibrações - CMS

Os estados de alarme dos aerogeradores são classificados em classes de gravidade, dos níveis 5 para 1.

Normalmente uma anomalia começa a mostrar-se com gravidade 4, se a falha se desenvolver são emitidas gravidades posteriores de 3, 2 e 1. Cada relatório de alarme emitido determina um período de espera (baseado na análise de tendência) para a ação recomendada.

A gravidade 6 expressa um “fora de ordem”, existência de problemas de comunicação, ligações, etc.

2.2.13 – Os sensores

Para a medição de movimentos vibratórios, utilizam-se transdutores/sensores, cuja finalidade é converter uma forma de energia (sinal vibratório mecânico existente na superfície da máquina) numa outra forma; normalmente, o sinal vibratório mecânico é transformado em sinais elétricos característicos da vibração do equipamento, cuja forma de onda está relacionada com o movimento mecânico [22].

Os sensores são colocados em diversos pontos dos componentes principais do aerogerador, conforme é mostrado na figura 16. Na chumaceira principal, na caixa multiplicadora e no gerador, os sensores instalados são do tipo AS062 (ver anexo C).

Foi necessário recorrer à perfuração da chumaceira principal, caixa de engrenagens e gerador, a fim de se conseguir colocar os sensores de vibração. A colocação dos mesmos seguiu criteriosamente as recomendações do fabricante do sistema CMS.

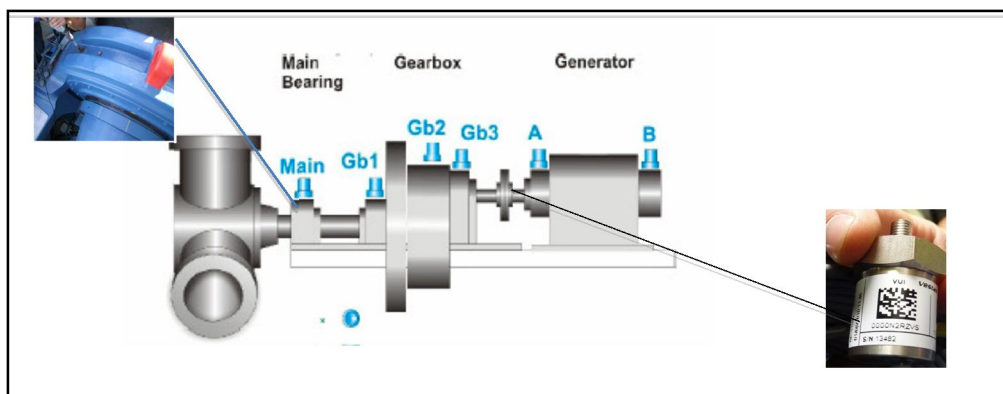


Figura 16 - Localização dos pontos de recolha de vibrações

2.2.13.1 - Seleção e instalação de sensores de Medição

A seleção do sensor apropriado pode ser tão importante como qualquer um dos passos relativo à aquisição de dados. Com efeito, a seleção deve ser feita com algum cuidado e reflexão, tendo em consideração os tipos de defeitos que se pretende detetar, os limites de frequência envolvidos, a localização do sensor, etc.

O principal objetivo da seleção do sensor é assegurar, antecipadamente, que o sinal da vibração está dentro de vários constrangimentos e que o tipo de sensor escolhido é o mais apropriado para o meio ambiente desejado.

Em síntese, devem ser tidos em conta os aspetos importantes, como sejam a sensibilidade, a frequência e condições de aplicação e robustez.

Foi necessário criar um sistema de *hardware* que permitisse adquirir em simultâneo os 8 e os 7 canais dos sensores do sistema mecânico e da torre respetivamente [Anexo F].

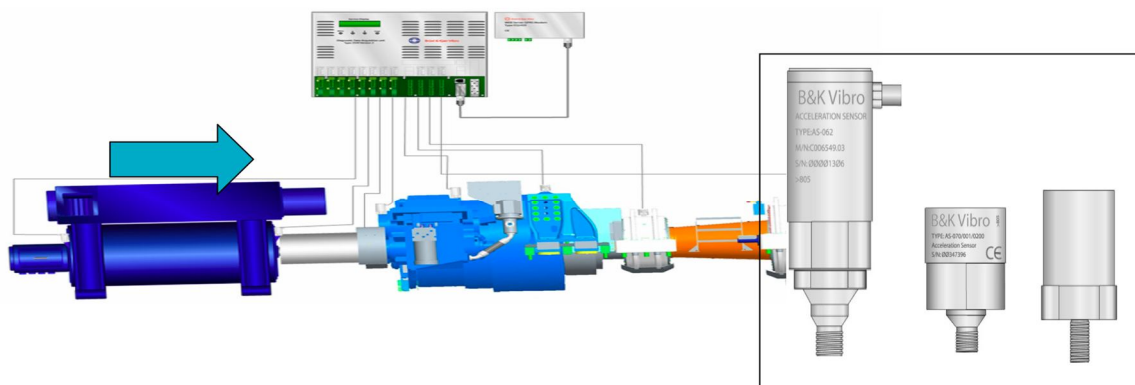


Figura 17 – Ligação dos sensores aos 8 dos 16 canais disponíveis [18]

O método de instalação do transdutor influencia a fiabilidade da informação a recolher; por isso, recorreu-se à instalação com base permanente roscada, para permitir uma recolha correta dos sinais vibratórios, e sempre no mesmo local, como se pode ver na figura 18. O sensor de vibrações é o elemento mais crítico na cadeia de medição, porque, sem um sinal rigoroso, os resultados da análise não serão fiáveis.



Figura 18 - Sensor na caixa multiplicadora (*gearbox*) – base permanente roscada

2.3 – Instalação de parque eólico

Antes de iniciarmos as fundações, devemos centrar a nossa atenção num estudo de prospeção geotécnica⁸, onde se pode ler uma caracterização geotécnica referente à natureza e às características do terreno.

A instalação de um parque eólico tem início na abertura e na realização dos maciços de fundação para aerogeradores. São abertas valas, para se proceder à instalação, por um lado, dos cabos elétricos e das restantes infraestruturas e, por outro, do edifício pré-fabricado destinado ao posto de corte e comando do parque.

As fundações são executadas em função dos esforços que lhes forem aplicados pelos aerogeradores de forma a garantir a estabilidade global do conjunto, em consonância com a regulamentação aplicável e as condições existentes no local, com especial atenção para as características dos solos.

Para evitar a mistura dos solos adjacentes com o betão, dos maciços, utilizam-se plásticos, ou outros meios, que constituam um elemento de separação.



Figura 19 - Instalação e transporte de componentes aerogeradores

2.4 – Avarias típicas de aerogeradores

As principais causas de vibração em aerogeradores residem em problemas mecânicos, originando vibrações provenientes de forças que mudam de direção e de intensidade. As características da vibração resultante são determinadas pela forma como a força é gerada [32].

É, por este motivo, que cada causa de vibração tem as suas próprias características.

Assim, as vibrações podem aparecer devido a fatores, como desequilíbrio, desalinhamento, rolamentos defeituosos, problemas em engrenagens, folgas, lubrificação deficiente e por último as ressonâncias.

⁸ Projeto de construção das fundações do parque eólico em Meroicinha

Na figura 20 é possível observar através do estudo de McNiff [2] que a principal causa de paragens em aerogeradores são as caixas multiplicadoras, logo acompanhadas pelas falhas elétricas.

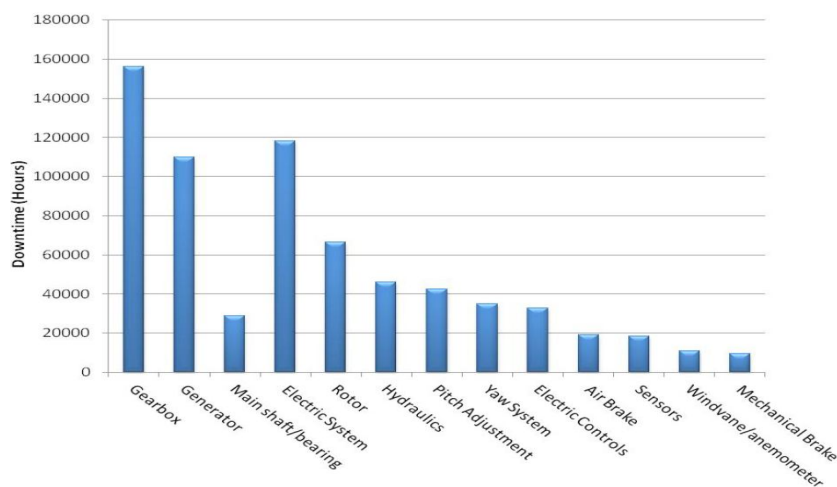


Figura 20 – Tempos de paragem / origem das falhas [2]

2.4.1 - Rolamentos defeituosos

Sendo os rolamentos um dos componentes mais importantes para o bom funcionamento dos aerogeradores, é pertinente incidir um estudo mais aprofundado sobre esta matéria.

É de realçar que já existem rolamentos de esferas cerâmicas nos veios de alta velocidade de alguns aerogeradores, visto que se trata de um elemento que é substituído com regularidade.

O tempo de vida de um rolamento é definido, normalmente, segundo o número de rotações que fará antes de apresentar os primeiros sinais de desgaste. Este apresenta-se sobre a forma de fendas e, com a passagem das esferas, soltam-se pequenas partículas que vão aumentando o defeito; este fenómeno é conhecido como *spalling* [33,34].

Segue-se, então, o aparecimento de vibrações nos rolamentos, devido a defeitos nas pistas, nas esferas ou nos rolos dos próprios rolamentos e que causam as vibrações de alta frequência. No entanto, a frequência não é, necessariamente, um múltiplo inteiro das rotações do veio, considerando, por exemplo, a tendência para as esferas ou rolos se “colarem” entre si ou deslizarem em certas situações, podendo gerar frequências de vibração que estarão mais diretamente relacionadas com ações de fricção e com impactos do que com a velocidade do veio [35].

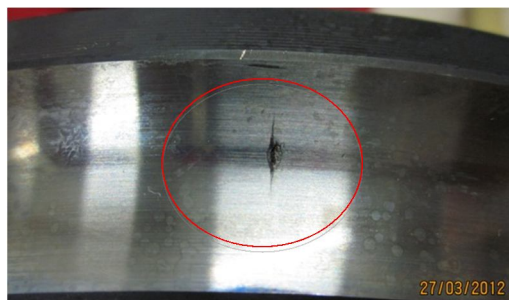


Figura 21 – Defeito na pista interna do rolamento do veio de alta velocidade

A amplitude da vibração depende da extensão do defeito do rolamento. A vibração gerada pelo rolamento, normalmente, não é transmitida para outros pontos da máquina. Por isso, o rolamento defeituoso é, normalmente, o que está mais perto do ponto onde as maiores vibrações deste tipo ocorrem. [33]

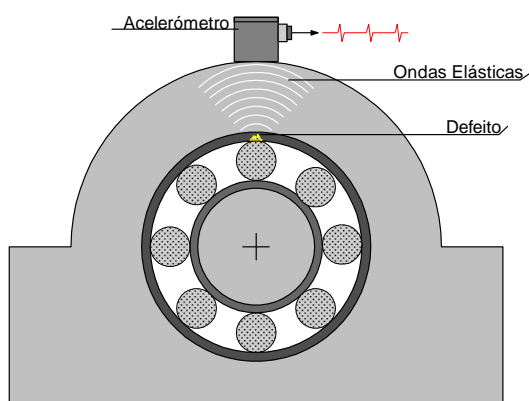


Figura 22 - Ondas elásticas provenientes de rolamentos defeituosos

2.4.1.1 - Causas da falha dos rolamentos

Os elementos que constituem um rolamento são construídos com grande rigor, de modo que os rolamentos não falham prematuramente, a não ser que outras forças os conduzam a tal situação. Essas forças são, normalmente, as mesmas que causam as vibrações. Então, mesmo quando a análise da vibração indica sintomas de problemas de rolamentos, não devemos excluir a possibilidade de a origem do problema ter sido causada por um outro fator. Devemos sempre analisar cuidadosamente a existência de outras deficiências, como desequilíbrios ou desalinhamentos, antes de se proceder à substituição do rolamento, especialmente nos casos em que houve frequentes falhas prematuras do rolamento.

As principais causas que estão na origem das falhas apresentadas pelos diversos elementos que compõem os rolamentos são a pré-carga incorreta, as tolerâncias dimensionais, o desalinhamento, a sobrecarga, a instalação defeituosa, velocidade admissível, o atrito, a vedação defeituosa e a lubrificação inadequada [36].

Das técnicas de controlo de condição de rolamentos por vibrações, destacam-se as seguintes: o nível global, as altas-frequências em aceleração e a análise envelope.

Como não existem normas de severidade para os rolamentos, a análise de tendência é a melhor opção. Surge, deste modo, a necessidade de se criar uma base de dados referente ao valor de alarme de vibrações e a respetiva fotografia após substituição do rolamento; só assim poderão ser construídos históricos adaptados à realidade eólica nacional.

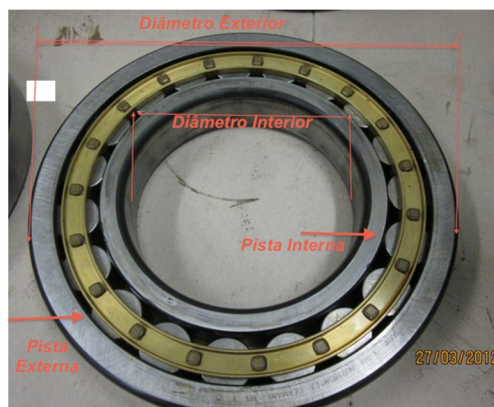


Figura 23 - Rolamento de rolos skf

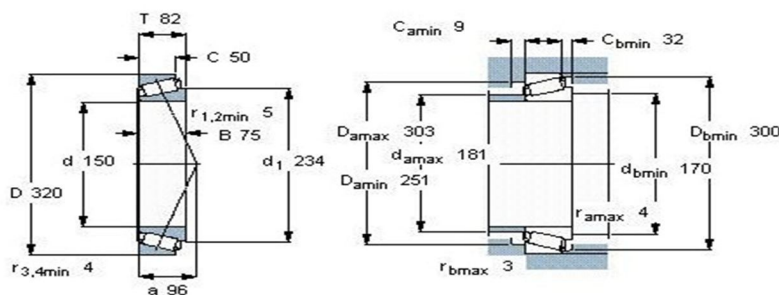


Figura 24 – Características técnicas de um rolamento de rolos skf

A utilização de rolamentos auto-compensadores de rolos aplica-se quando pretendemos suportar cargas muito elevadas, deflexões do eixo e desalinhamento

O projeto dos rolamentos auto-compensadores permite que desalinhamentos angulares entre os anéis externos e internos possam ser acomodados sem qualquer efeito sobre o desempenho do rolamento.

A capacidade de exploração completa desses valores depende do modelo da combinação de rolamentos, do tipo de vedantes utilizados etc. Quando a posição do desalinhamento é variável em relação ao anel externo do rolamento, ocorre um escorregamento adicional no rolamento nas condições normais de funcionamento. Assim sendo, com referência ao atrito do rolamento e à geração de calor associada, recomenda-se que o desalinhamento do anel interno em relação ao anel externo não exceda alguns décimos de um grau.

Os rolamentos vedados podem suportar desalinhamento angular de cerca de $0,5^\circ$ do eixo em relação à caixa.

A seleção correta de rolamentos não consiste apenas nos rolamentos em si, mas também inclui os componentes associados aos rolamentos, como o veio e a chumaceira. O lubrificante também é um componente muito importante, pois evita o desgaste e protege contra corrosão para que os rolamentos possam apresentar o máximo desempenho. Além destes, o vedante também não pode ser descuidado, cujo desempenho é de extrema importância para a limpeza do lubrificante. A limpeza possui um efeito profundo na vida útil do rolamento, motivo pelo qual os lubrificantes e vedantes se tornaram parte dos negócios dos fabricantes de rolamentos [36].

Os dados referentes ao diagnóstico de possíveis defeitos em rolamentos devem ser recolhidos, através do transdutor e junto à zona de carga da chumaceira; se assim não suceder, os dados obtidos podem não corresponder à verdadeira condição de funcionamento dos rolamentos.

No que respeita às consequências que podem advir dos rolamentos defeituosos, teremos de considerar as seguintes a prisão da chumaceira, a deterioração da caixa do rolamento, o empeno do veio e o empeno do acoplamento.

2.4.1.2 - Fases de degradação dos rolamentos

Numa fase inicial, a degradação de um rolamento é impercetível aos sentidos humanos; de facto, não só a sua amplitude é reduzida, como também as vibrações nele gerado são submersas pelas restantes vibrações da máquina.

Por isso, a emissão de altas-frequências produzidas por defeitos nos rolamentos aparece em quatro fases distintas [37].

A figura 25 indica as fórmulas necessárias para o cálculo das frequências de defeito dos rolamentos, para tal é necessário conhecer as características técnicas do rolamento em estudo, essa informação pode ser obtida através de catálogos.

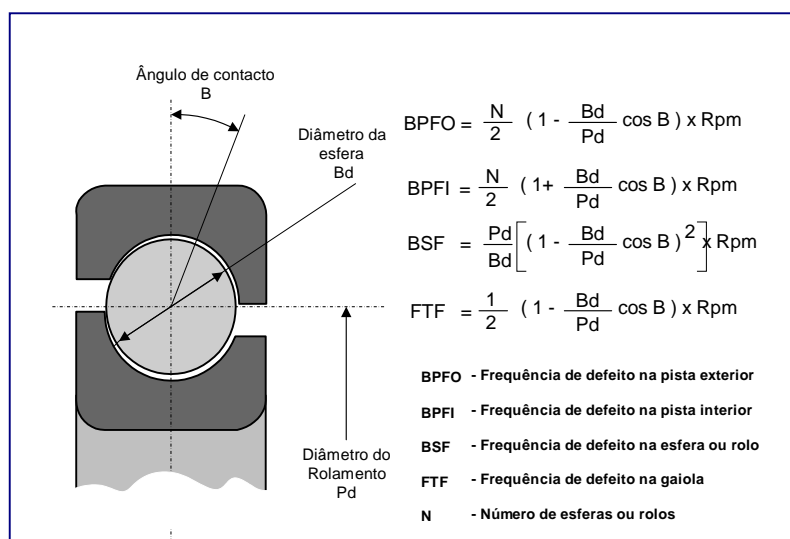


Figura 25 - Frequências de defeito [11]

A primeira fase corresponde ao início da avaria. Nesta fase, existem micro fissuras nas pistas, assim como micro roturas na gaiola e nos elementos rolantes. As características desta primeira fase são os ultra-sons e as vibrações a frequências elevadíssimas, a não visibilidade do defeito a olho nu, a temperatura em valores normais, um nível global de vibrações baixo e a inexistência de impulsos às frequências características.

Na segunda fase de degradação, a falha torna-se visível a olho nu e é detetável pelo ouvido humano, pois estamos perante o facto de os impactos gerados excitarem a(s) frequência(s) natural (ais) dos componentes dos rolamentos. Estas frequências manifestam-se, predominantemente, na gama de 500Hz – 2.000Hz; a temperatura mantém-se normal, mas existe um grande aumento nos ultra-sons. Também se nota um ligeiro aumento nos valores de níveis globais medidos em aceleração e em velocidade.

Na análise espectral, as frequências características do rolamento do veio de alta velocidade danificado (fig.21) já são claramente visíveis em unidades de aceleração, como pode ser observado na figura 26.

O espectro e os valores globais após substituição do referido rolamento encontram-se no anexo A5.1.

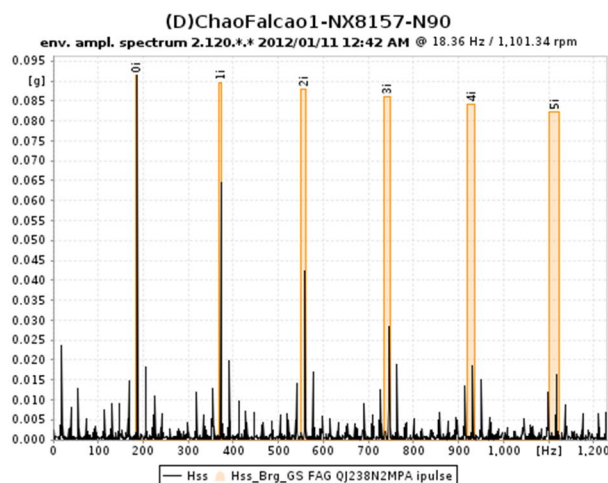


Figura 26 - Espectro típico de defeitos em rolamentos

Na terceira fase, a superfície da pista apresenta um estado significativo de degradação e o arranque de material tem por efeito arredondar completamente os bordos da fenda. Nesta fase, o defeito é visível a olho nu.

Apresenta um nível de ruído perfeitamente audível, a temperatura sofre um ligeiro aumento, as amplitudes são muito elevadas nos ultrassons e regista-se um grande aumento do nível global de vibrações, quer em aceleração, quer em velocidade.

Na análise espectral, as frequências características do rolamento já são claramente visíveis e com harmónicas e bandas laterais, em escala logarítmica e linear, caracterizada pelo aparecimento das

frequências típicas de defeito do rolamento (BPFI, BPFO, BSF e FTF) e harmónicas (gama de frequências até 1.000Hz). Nesta fase, o defeito é, normalmente, visível.

Apresenta um aumento notório do ruído de fundo ou o aparecimento de “relva” no espectro de frequências. É recomendável a substituição do rolamento nesta fase.

Na quarta fase, é inevitável a substituição do rolamento, uma vez que atingiu o final da sua vida útil. Neste caso, o defeito é completamente visível a olho nu. Verifica-se uma alteração do ruído emitido e surge um aumento significativo de temperatura; antes do colapso, aparece uma diminuição gradual seguida de um aumento brusco nos ultrassons. Regista-se uma emissão acústica e vibrações acima dos 5kHz; o nível global sofre um aumento significativo em deslocamento e em velocidade, diminuindo em aceleração. Os impulsos de vibração predominantes nas frequências características do rolamento são mais baixas e o ruído de fundo do espectro é muito elevado.

Nesta fase, a amplitude da componente a 1xRpm também é, normalmente, afetada. As frequências típicas de defeito do rolamento começam a “desaparecer” e são substituídas por um ruído espectral, ou seja, regista-se uma subida da “relva” do espectro.

2.4.2 - Defeitos em engrenagens

Existem vários tipos de fenómenos que estão na origem dos defeitos em engrenagens utilizadas nas caixas multiplicadoras dos aerogeradores, como a micropicagem (*micropitting*), picagem (*pitting*) e escamação (*spalling*) [38].

Estes termos servem para designar diferentes graus da degradação por fadiga de contacto. O termo *micropitting* é utilizado para designar o processo de degradação por fadiga de contacto à escala dos picos de rugosidade, isto é, à escala microscópica e com origem superficial, consistindo na formação de pequenos *micropits* ou microescamas pouco profundas, entre 10 µm e 20 µm na superfície de contacto, com diâmetros individuais que, em geral, não ultrapassam os 100 µm.

O aparecimento deste tipo de falha resulta da conjugação de vários fatores, nomeadamente: as rugosidades superficiais, as pressões de contacto locais, o tipo de material e os tratamentos térmicos a que o material esteve sujeito.

Existe ainda outra variante de *micropitting*, que se caracteriza pela presença de manchas cinzentas (*gray staining*) localizadas de forma aleatória, mas incidindo, sobretudo, nas zonas dos flancos onde a carga é mais elevada. Normalmente, aparecem devido a uma lubrificação deficiente, resultado da espessura reduzida de filme ou de uma rugosidade superficial elevada.

A rapidez com que o *micropitting* pode evoluir para o *pitting* varia bastante, sendo o fator mais influente a existência de tensões tangenciais nas superfícies em contacto.

O *pitting* aparece quando as tensões de contacto se desenvolvem junto à superfície. Os fatores que contribuem para o seu aparecimento são a espessura de filme lubrificante insuficiente, a rugosidade excessiva das superfícies e a existência de partículas de grandes dimensões no lubrificante.

Este defeito é característico das engrenagens endurecidas superficialmente e retificadas, ocorrendo nas zonas mais carregadas dos flancos dos dentes e tende a propagar-se por mecanismos de fadiga. Este fenómeno também é possível que suceda por efeito da evolução em profundidade do *micropitting* e as suas crateras, formadas de forma semelhante às crateras do *micropitting* (explicar melhor), mas distinguem-se destas últimas por apresentarem tamanhos e profundidades nitidamente superiores, geralmente na ordem dos 0.1 mm, com diâmetros entre os 0.3 e os 2 mm.

O *spalling* tende a desenvolver-se na camada sub-superficial, onde ocorrem os valores máximos da tensão de corte. As fissuras propagam-se paralelamente à superfície e, quando atingem dimensões consideráveis, podem fazer com que o material acima da fissura se liberte da superfície, provocando uma cratera de bordos vivos. Os aços que sofreram tratamentos térmicos de endurecimento superficial podem ver arrancadas grandes porções de material da superfície, sendo esta uma forma de degradação grave das superfícies.

2.4.2.1 – Desgaste das engrenagens

Trata-se do arranque progressivo de material da superfície à escala das rugosidade, tendo origem em vários mecanismos, de onde se destaca a deformação plástica, abrasão (ação abrasiva de partículas que entram na zona de contacto), adesão e desgaste químico. A origem das partículas neste tipo de desgaste são autogeradas na fase de arranque ou paragem do aerogerador.

O desgaste com deposição consiste na remoção de material da chumaceira, geralmente do apoio, e posterior deposição desse material noutro ponto da chumaceira, sendo as principais causas as sobrecargas, perda de lubrificação e desalinhamentos.

O desgaste por fadiga ocorre quando os contatos duram um elevado número de ciclos em rolamentos, formando-se partículas de desgaste devido à propagação de fendas de fadiga.

Este fenómeno está diretamente relacionado com a lubrificação. A temperatura a que o equipamento opera será um fator determinante na degradação do lubrificante, o aumento da temperatura implica normalmente o aumento do atrito entre duas superfícies, criando as condições favoráveis para o desenvolvimento de deformações plásticas.

2.4.2.2 – Frequências de engrenamento da caixa multiplicadora

Para se conhecer as frequências de engrenamento da caixa multiplicadora, foi necessário recorrer às listas de peças [Anexo C-4], a fim de se contabilizar os números de dentes de cada engrenagem, sem os quais não seria possível calcular as respetivas frequências. Para se proceder à realização desses cálculos, é necessário conhecer o número de dentes de cada engrenagem e a velocidade de rotação no momento da análise.

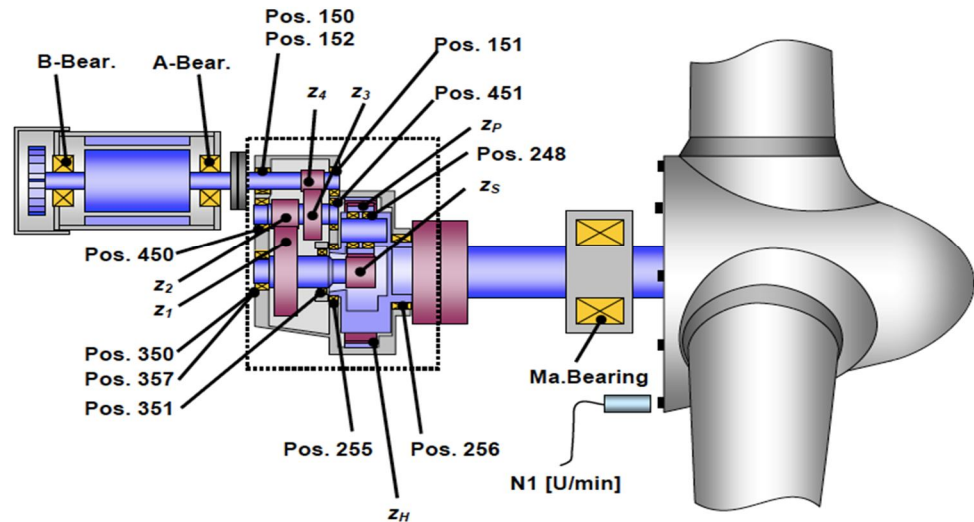


Figura 27 – Identificação da localização das engrenagens e rolamentos [Anexo D-1]

Frequência de engrenamento dos dentes:

$$f_z = \frac{Z_s \cdot Z_h}{Z_s + Z_h} \times f_{ns}$$

Frequência de engrenamento *Sun*, $K = n^\circ \text{planetários}$

$$f_s = \frac{K \cdot Z_h}{Z_s + Z_h} \times f_{ns}$$

Frequência de engrenamento alta velocidade:

$$f_{hss} = Z_4 \times f_n(hss)$$

Figura 28 – Fórmulas para o cálculo das frequências de defeito em engrenagens [46]

É de extrema importância o cálculo das frequências de engrenamento, para tal é necessário contabilizar o número de dentes do anel interno do estágio planetário (Z_H) e multiplicar pela velocidade de rotação, e assim sucessivamente com o número de dentes da roda do *Sun* (Z_S) e o número de dentes do planetário (Z_P). O Z_1 e Z_2 pertencem ao estágio helicoidal intermédio e por fim para se proceder ao cálculo da frequência do estágio de alta velocidade, contabilizam-se os dentes no veio de saída da caixa multiplicadora Z_4 multiplicando pela velocidade de rotação do mesmo. Os números de dentes de cada roda dentada encontram-se no anexo D-4.

Para se poder identificar no espectro as frequências relacionadas com defeitos em engrenagens, primeiro procede-se ao cálculo com base nas fórmulas apresentadas na figura 28, depois identifica-se no espectro mas com uma particularidade, normalmente a frequência de engrenamento estará acompanhada de bandas laterais.

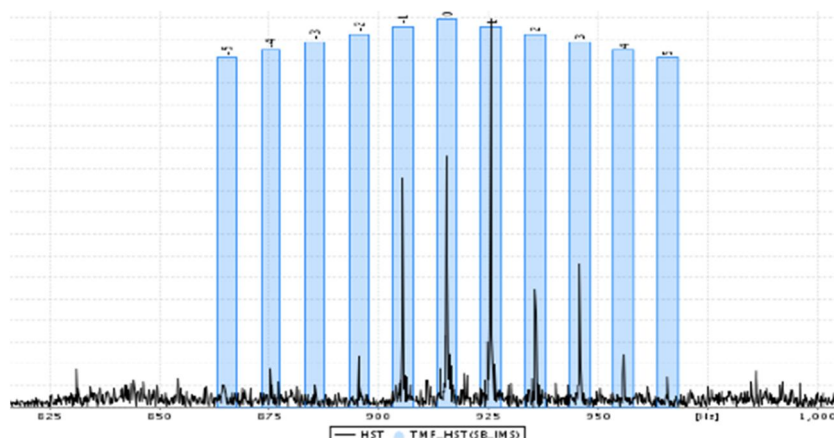


Figura 29 – Espectro de frequências de defeito em engrenagens acompanhado de bandas laterais

2.4.3 - Problemas de lubrificação

Existem vários tipos de problemas associados à deficiente lubrificação em engrenagens. A lubrificação é promovida pela interposição de um filme entre dois corpos em contacto com movimento relativo, com a finalidade de diminuir o atrito, o desgaste e a temperatura de funcionamento.

Existem dois fenómenos físicos que influenciam a duração do óleo na caixa multiplicadora – a deformação elástica dos sólidos em contacto, devido à ação da carga aplicada, e o aumento de viscosidade do fluido lubrificante sob efeito da pressão.

As avarias das engrenagens que dependem da lubrificação raramente se devem ao lubrificante em si, dado que são quase sempre resultantes de uma seleção inadequada do lubrificante, de defeitos no sistema de lubrificação, de um doseamento erróneo ou da contaminação do próprio lubrificante. Quando é contaminado por gases ou líquidos, o lubrificante fica sujeito à destruição da química de funcionamento dos seus aditivos, podendo estes ser dissolvidos ou absorvidos pelo lubrificante. Nos casos em que haja contaminantes sólidos – poeiras e partículas metálicas –, apesar de serem os mais destrutivos, têm a vantagem de serem aqueles que são detetados e eliminados mais rapidamente [41].

O lubrificante tem um papel determinante na fadiga devido à ação da carga aplicada. Contudo, deve ser realçado o facto de os elementos químicos da sua composição poderem exercer alguma influência a nível de desgaste, desencadeando a consequente fadiga.

Uma fissura superficial pode crescer rapidamente por efeito da pressão do óleo contido no seu interior e da concentração de tensões que se verifica na sua extremidade. Este processo pode dividir-se em três fases, a saber: a primeira fase, que corresponde à abertura da fissura por efeito das tensões de corte; a segunda corresponde ao enchimento da fissura com óleo e a terceira, através da pressurização do óleo. Se se pretender minimizar este efeito, então deve usar-se um lubrificante com maior viscosidade e compressibilidade.

A presença de partículas de desgaste e contaminantes no lubrificante podem contribuir para a degradação da superfície. As partículas contaminantes, em particular, podem provocar pequenas

indentações nas mesmas quando passam no interior do contacto, dando origem a zonas propensas para a iniciação de fissuras [42].

A seleção de um lubrificante contendo aditivos de extrema-pressão e um aumento da espessura do filme lubrificante permitem atenuar gradualmente este fenómeno.

Um ambiente corrosivo pode afetar o comportamento à fadiga de contacto. A presença de água nos lubrificantes pode acelerar a degradação dos componentes rolantes. Isto sucede uma vez que este elemento induz a difusão de hidrogénio nas superfícies sob tensões elevadas, provocando a fragilização pelo hidrogénio e acelerando a propagação das fissuras de fadiga. A oxidação ácida, durante o rolamento de contacto, pode libertar hidrogénio devido à reação eletroquímica com aço, assumindo a água o papel de meio condutor.

Muitas vezes, torna-se difícil impedir a contaminação por água, mas os efeitos prejudiciais da sua presença na fadiga de contacto podem ser combatidos com aditivos apropriados [43].

2.4.3.1 - Importância dos aditivos no lubrificante

Os aditivos são compostos químicos que se adicionam aos lubrificantes com a finalidade de proporcionar ou reforçar uma propriedade desejada. Aditivos de extrema pressão são utilizados para impedir o contacto destrutivo entre superfícies metálicas com movimento relativo e submetidas a cargas elevadas, os aditivos anti-desgaste são compostos que reduzem ou eliminam o desgaste por atrito, os dispersantes são compostos que evitam a formação de depósitos gomosos nas superfícies metálicas, os inibidores de ferrugem são aqueles que por interação física ou química com certos metais formam uma película continua que adere tenazmente às superfícies metálicas, impedindo que a água entre em contato com elas, ainda existem os aditivos antioxidantes, estes destinam-se a retardar ou modificar a reação dos óleos com o oxigénio, por fim e não menos importante os melhoradores de índice de viscosidade e os inibidores de espuma [45].

2.4.3.2 – Degradação de lubrificantes

A duração de um lubrificante é limitada por diversos fatores, entre eles a oxidação, perda de aditivos, variação da viscosidade e a sua contaminação. Quando surge uma diminuição significativa da viscosidade, esta pode causar a redução da espessura do filme lubrificante ou até mesmo a sua rutura, este facto deve-se às elevadas temperaturas e cargas, sejam estas no arranque ou na paragem do aerogerador, permitindo o aumento da interação dos contaminantes. Não devendo ser descurado o aumento da viscosidade sendo este um indicador da oxidação do óleo resultado de excesso de calor gerado pelo equipamento, dificuldade na libertação das bolhas de ar e dificuldade de circulação no arranque a frio.

A contaminação pode surgir devido a partículas, sendo estas responsáveis pelo desgaste, abrasão, fadiga e erosão, as partículas aceleram o processo de oxidação do óleo e aumentam a sua viscosidade. A água também é um contaminante, esta está presente na atmosfera, nas

condensações, fugas de refrigeradores, na reação com os aditivos, promovendo a corrosão, formação de microrganismos e de ferrugem nas superfícies [45].

2.5 – Manutenção de caixas multiplicadoras em Aerogeradores

As operações de manutenção em caixas multiplicadoras seguem um plano de manutenção definido pelo fabricante, de onde se destaca a verificação de falhas (fissuras) nos apoios da caixa com uma periodicidade de 3, 6 e 12 meses. Relativamente às operações na caixa são realizadas inspeções trimestrais, semestrais, anuais ao nível de ruído e vibrações, nível de óleo, limalhas metálicas, contaminação (endoscopias), sujidade e pintura da mesma. Semestralmente é recolhida uma amostra de óleo da caixa multiplicadora, esta deverá ser retirada sempre do mesmo ponto (antes do filtro), e o mais rapidamente após a sua paragem. A amostra deve ser armazenada em recipiente próprio, um frasco de vidro transparente, perfeitamente limpo e com referência do tipo de óleo, número da máquina, horas de funcionamento no momento da recolha e data da recolha.

Uma vez por ano são substituídos os filtros de ar, já o óleo será substituído após os resultados das análises ao mesmo ou de acordo com as indicações do fabricante (2-3 anos).

Podem realizar-se análises intermédias sempre que se verifiquem situações que exijam um controlo mais apertado ou outro qualquer motivo que o justifique, as análises de óleo hidráulico são realizadas anualmente e o óleo das caixas de Pitch e Yaw não é monitorizado por análise, este apenas será substituído a cada 5 anos.

Anualmente é verificado o alinhamento entre o veio de saída da caixa multiplicadora e o gerador.

Estas são apenas algumas das operações de manutenção que os responsáveis pela manutenção de um parque eólico devem analisar, sendo que, normalmente, sempre que existam situações anómalas, estas devem ser devidamente encaminhadas à empresa responsável pela manutenção.

Importa referir que o pessoal da manutenção inicia a sua carreira a fazer testes de descida em altura, pois, a qualquer momento, podem ter que descer pela parte exterior do aerogerador.

2.5.1 – Os procedimentos para a substituição de óleo

Para se efetuar uma mudança de óleo a uma altura aproximadamente de 80 m (fig.30), é necessário recorrer a dois tubos – um para extração do óleo usado e outro para colocação do óleo novo provenientes do camião transportador (fig.31). Para a elevação dos tubos em causa para a *nacelle*, utiliza-se o monta-cargas que está localizado no interior desta.



Figura 30 - Procedimentos para a substituição de óleo a uma altura de 80m

São necessários 360 litros de óleo para a caixa multiplicadora, cujo valor se aproximará dos 5000 euros, o processo de substituição tem um tempo aproximado de 4 horas. Assim, tendo em conta estes valores e para que os custos sejam devidamente acautelados, devem ser elaborados procedimentos de gestão e de distribuição do óleo, não negligenciando aquele que sobra das substituições e que pode ser utilizado em reposições de nível das caixas multiplicadoras.

Os óleos são produtos químicos e o seu armazenamento deverá respeitar algumas condições, tais como, não devem ser armazenados ao ar livre, não devem ser expostos a radiação solar, a sua acessibilidade deve ser limitada a pessoal autorizado, devem estar perfeitamente identificados nos recipientes e nos equipamentos, o local de armazenamento deve estar preparado para absorver possíveis derrames e o seu armazenamento não deve ser realizado por períodos prolongados. O óleo armazenado poderá ser encontrado unicamente em recipientes de 1000, 208 e 20 litros.

Uma lubrificação adequada garante que os gradientes de temperatura a que o rolamento está exposto sejam menores. O lubrificante deverá possuir melhores características em determinados parâmetros, nomeadamente no que se refere à oxidação e à corrosão (por exemplo, uma massa lubrificante com espessante à base de sulfonato de cálcio).

O período atual de relubrificação é indicado para condições ótimas de operação. Seria, portanto, conveniente adequar a periodicidade entre relubrificações para ciclos mais curtos (1/2 do período atual; cerca de 3 meses).



Figura 31 – Camião de transporte de óleo

2.5.1.1 – Central hidráulica

As centrais hidráulicas necessitam de cerca de 40 litros de óleo Mobil SHC 629.

O óleo deve ser retirado com auxílio de uma bomba externa. Após remoção do óleo, a cuba deve ser aberta, retirando a tampa de visita (centrais de travão passivo) ou retirando a bomba (centrais de travão ativo) para limpeza da cuba. A limpeza da cuba deve ser feita com trapo que não largue fios nem borboto.

O óleo deve ser colocado dentro da central através do filtro de arejamento.

2.5.1.2 – Caixa do pitch

O óleo deve ser retirado com auxílio de uma bomba através do bujão de esvaziamento e os seguintes passos devem ser realizados, colocação da caixa na vertical, depressurizar a caixa ativando a tomada de enchimento, retirar o óleo através do bujão de esvaziamento mantendo a tomada de enchimento ativada.

O óleo novo deve ser colocado através da tomada de enchimento com o tubo do vaso de expansão desligado.

2.5.1.3 – Caixa do yaw system

O óleo deve ser retirado com auxílio de uma bomba através do bujão de esvaziamento e os seguintes passos devem ser realizados, retirar o bujão de arejamento (parte superior da caixa) e retirar completamente o óleo.

O óleo novo deve ser colocado através na válvula de arejamento mantendo o bujão de arejamento aberto.

2.5.1.4 – Reposição do nível de óleo

Os níveis de óleo são verificados a cada 6 meses, no entanto na maioria dos casos a necessidade de reposição apenas se verifica uma vez por ano, na medida em que na substituição de cada filtro se perdem aproximadamente 10 litros de óleo, não sendo esta diminuição perceptível no indicador de nível. Em média são acrescentados 20 litros de óleo por ano em cada caixa multiplicadora.

Nas tarefas de acerto de nível, os seguintes passos deverão ser considerados antes da introdução do óleo, verificar o tipo de óleo na caixa, confirmar que a bomba de óleo não está em funcionamento há mais de 5 minutos e limpar a envolvente da tampa da caixa e do recipiente para evitar que resíduos, poeiras ou ferramentas caiam no interior da caixa.

No anexo C5 encontram-se os vários tipos de óleo aplicados em caixas multiplicadoras.

Capítulo 3

Tecnologias de Medição

3. Tecnologias de Medição para avaliação do Estado de Condição em Aerogeradores

3.1 Conceitos básicos de vibração para análise de vibrações

A vibração é o movimento relativo de um ponto ou de um corpo em relação a uma posição de referência (normalmente a sua posição de repouso) [30].

As vibrações em estruturas eólicas é uma problemática, que constitui motivo de grande preocupação para a comunidade científica⁹. O estudo de técnicas de controlo tem vindo a ser fortemente desenvolvido no último século, com a intenção de minimizar os danos causados por ações externas, que estão fora do controlo humano, tais como as vibrações provocadas por sismos ou por ventos. Estas forças, ao atuarem na estrutura, podem alterar o seu comportamento, bem como colocar em causa a sua segurança [31].

Os problemas relacionados com as vibrações em estruturas eólicas são muito particulares devido ao facto de integrarem no seu topo várias toneladas de peso e estarem sujeitas a paragens súbitas, que provocam vibrações na estrutura. Devido a tal preocupação, é neste campo que se vai tentar intervir com o objetivo de se conhecer a resposta da estrutura através da instalação permanente de sensores na torre.

Para se atenuarem as vibrações em estruturas, existem alguns meios disponíveis, tais como: a modificação da rigidez e da massa, o amortecimento ou forma da estrutura, ou ainda a aplicação de sistemas de controlo.



Figura 32 – Queda de Aerogerador em Vila do Bispo

⁹ Problemas de ressonâncias em torres eólicas que provocaram a sua queda

3.1.2 Frequência Natural

Frequência natural é a frequência à qual uma máquina ou estrutura irá vibrar quando sujeita a uma vibração livre, é a sua resposta após a aplicação de uma força momentânea $f(t)$. [30]

A equação de equilíbrio / movimento é dada pela seguinte expressão:

$$m.\ddot{x} + c.\dot{x} + k.x = f(t) \quad (3.1)$$

Onde m , é a massa do sistema, c , o amortecimento e k a sua rigidez.

3.1.3 Movimento Harmónico

O movimento harmónico é a forma mais simples de vibração; todo o Movimento Harmónico é periódico, logo, irá repetir o seu movimento em intervalos iguais de tempo. Quando representado graficamente em função do tempo, fornece-nos uma curva sinusoidal (fig. 33). [31]

O movimento do corpo vibrante à volta da sua posição de referência pode ser matematicamente descrito pela seguinte equação:

$$x(t) = A \sin(\omega t) \quad (3.2)$$

- t representa o tempo em s
- $x(t)$ designa-se por valor instantâneo do movimento
- A designa-se por amplitude do movimento
- ω designa-se por frequência circular, medida em rad/s

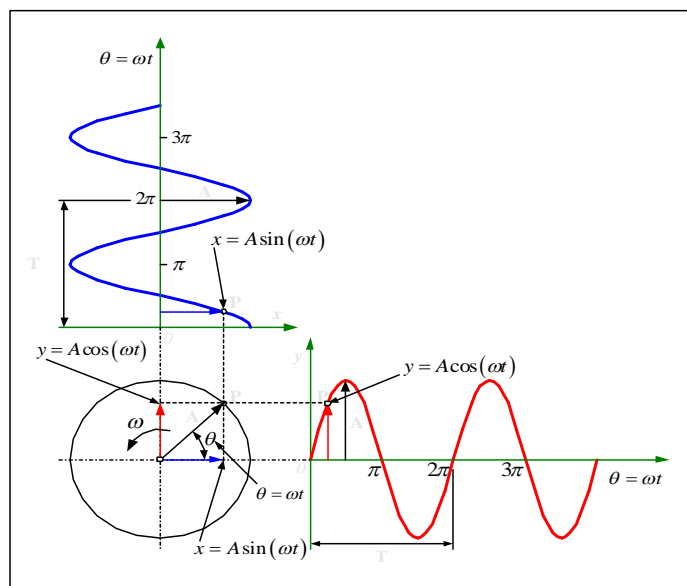


Figura 33 – Movimento Harmónico Simples

A frequência é o número de vezes que um determinado acontecimento ocorre num determinado espaço de tempo, sendo a sua unidade o Hertz.

Dado que a função circular se repete ao fim de 2π radianos, um ciclo de movimento completa-se quando, ou seja, o período pode ser definido como o tempo necessário para completar um ciclo; o período é o inverso da frequência e a quantidade de ciclos numa unidade de tempo é a frequência [31].

3.1.4 Amplitude

As características da vibração, ou seja, o deslocamento, velocidade e aceleração são medidas de forma a determinar a severidade de uma vibração, a estas são normalmente referenciadas como a amplitude da vibração. [31]

Estas três grandezas são, portanto, três formas diferentes de caracterizar o valor da amplitude, para uma dada frequência.

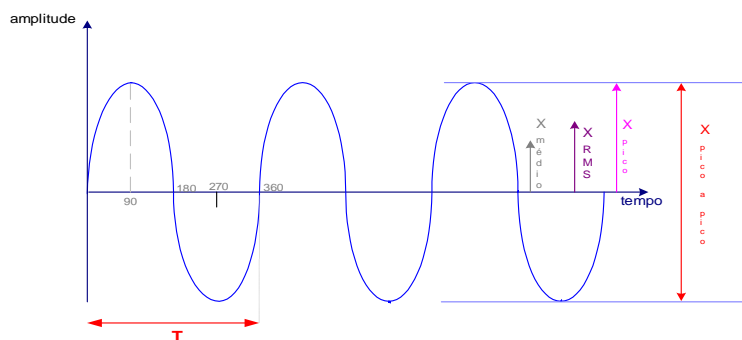


Figura 34 – Representação das unidades de medida da Amplitude

A amplitude pode ser expressa em **valor eficaz** ou **RMS** (root mean square), **pico** (P), **pico-a-pico** (P-P) e **valor médio**.

3.1.4.1 Amplitude da vibração (RMS)

O valor **RMS** (Valor eficaz), é o valor mais relevante para definir a amplitude de vibração, uma vez que tem em conta a evolução do sinal no tempo e, por outro lado, encontra-se diretamente relacionado com a energia contida na vibração, e, como tal, consegue exprimir a capacidade destrutiva do sinal vibratório.

Este termo é muito utilizado quando as vibrações são aleatórias ou consistem num número de vibrações sinusoidais com diferentes frequências.

Para um movimento harmónico, o valor RMS é $0.707 \times \text{Pico}$.

Para se proceder ao cálculo do valor de Amplitude RMS, temos que conhecer o período de amostragem do sinal recolhido num determinado tempo e número de pontos (N), e pode ser calculado

através da seguinte fórmula:
$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{N-1} x_i^2}{N}} \quad (3.3)$$

O intervalo de tempo entre cada leitura do equipamento analisador depende do número de pontos adquiridos. [46].

3.1.4.2 Amplitude da Vibração em Análise Envelope

A técnica de análise envelope é baseada na desmodulação da amplitude, este processo consiste em eliminar as componentes de alta energia e baixa frequência, através de um filtro passa alta, amplificador, seguido de retificador e filtro passa baixa.

O objetivo será eliminar as baixas frequências resultantes de outras fontes de vibração, como sejam desequilíbrios, desapertos, desalinhamentos e folgas. Estas frequências apresentam amplitudes muito superiores às amplitudes das frequências induzidas pelos defeitos em rolamentos.

Na medida convencional em aceleração, estas frequências, normalmente, de baixa amplitude, encontram-se submersas no ruído de fundo não sendo possível a sua identificação, mas, uma vez filtrado o sinal as componentes de alta-frequência passam por um circuito detetor de pico a pico, o qual deteta e retém as amplitudes pico a pico do sinal. Este processo também é conhecido por **envolvente**. [32]

3.1.5 Processamento de Sinais vibratórios

Depois de captada a vibração, o sinal elétrico gerado pelo transdutor é enviado pelo cabo até ao aparelho medidor/analisador, que pré-amplifica e trata esse sinal elétrico.

Na tabela 2, são apresentados os princípios e funções fundamentais, sendo, na sua essência, os mesmos para todos os aparelhos analisadores:

Princípios e Funções Fundamentais
Pré-amplificação do sinal elétrico
Filtragem do sinal por diversas bandas de frequência
Comparação do valor da amplitude da vibração, em cada banda de frequência, com um valor de referência, para medir o valor da amplitude do sinal
Cálculo da média das amplitudes do sinal, tendo em consideração a sua frequência, para obter o valor global da vibração.

Tab. 2 – Funções fundamentais dos sinal recolhido

Um dos principais métodos para análise em frequência ou análise espectral, baseia-se nas transformadas de *Fourier*, que tem como objetivo tratar matematicamente o sinal no tempo (forma de onda), simples ou complexo, de forma a calcular as frequências que se encontram presentes no sinal e respectivas amplitudes.

Segundo *Jacques Fourier* (1768-1830), qualquer função complexa pode ser decomposta numa série de componentes harmónicas de diferentes frequências. [32]

Os coletores/analísadores de dados atuais incluem um “chip” programado para executar o cálculo da função **FFT**.

Ao adquirirmos um sinal, temos de definir o período de amostragem, T_a , e o número de amostras N . A FFT é um algoritmo de cálculo sobre uma amostra de um sinal. Quando a transformada de *Fourier* é calculada, baseada no bloco N^{10} , obtém-se um espectro correspondente à multiplicação no domínio da frequência, pela função de impulsos transmitidos. O espaço entre eles denomina-se a resolução de frequência ou largura de banda.

O facto de se aplicar a FFT a sinais temporais discretos introduz alguns erros que, de alguma forma, deturpam a verdade dos valores obtidos no espectro de frequência. [46]

Nos analisadores espectrais, quando se pretende definir um espectro FFT, não se costuma escolher o período de amostragem, T_a , mas sim a frequência máxima, $f_{\text{máx}}$, e o número de amostras, N .

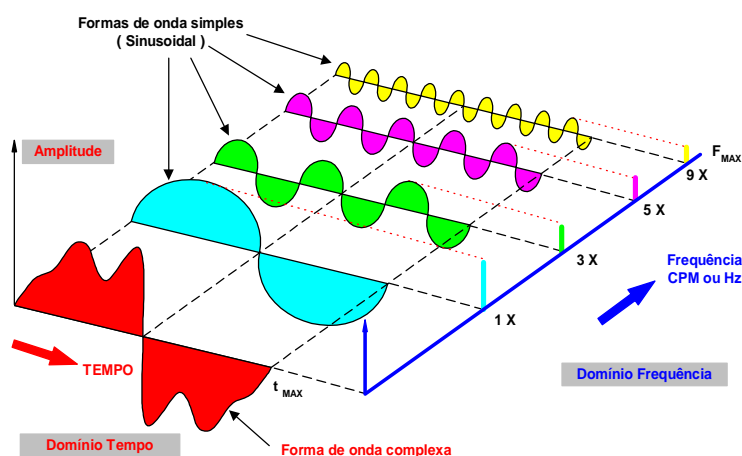


Figura 35 – Forma de onda no domínio do tempo e frequência

Vantagens na utilização da FFT:

- O espectro de frequências é discreto e equidistante, logo, o sinal no tempo é analisado em larguras de banda absolutas e constantes;

¹⁰ Número de amostras do sinal inicial

- Cálculo de elevado número de funções aplicáveis a medições multi-canal e análise do sistema como sejam a correlação, a coerência, as funções de resposta em frequência;
- Processamento do sinal no tempo em blocos; cada bloco de registos é guardado em memória para posterior processamento pela FFT.

As limitações da aplicação do algoritmo FFT podem ser resumidas em três efeitos; o aliasing, os efeitos de janela (*window effects*) e o picket fence effect¹¹. [46]

3.1.5.1 Aliasing

A transformada num sinal de 1024 pontos (ou amostras) obtém 512 componentes de frequência e só 400 destes são mostrados em *display*. A frequência central do filtro *anti aliasing* é colocada algures entre os 500 e os 640 Hz, de modo a produzir o menor erro possível. Este exemplo mostra que o filtro *anti-aliasing*, embora necessário, leva a compromissos na análise que resultam na redução de cerca de 78% o número de linhas amostradas.

O teorema de *Nyquist's sampling* prova que, para não se perder a informação contida num sinal amostrado, é necessário que a frequência de leitura ou amostragem (**Fa**) do conversor A/D seja, pelo menos, **duas vezes** o valor do **Fmáx** selecionado (frequência de interesse contida no sinal).

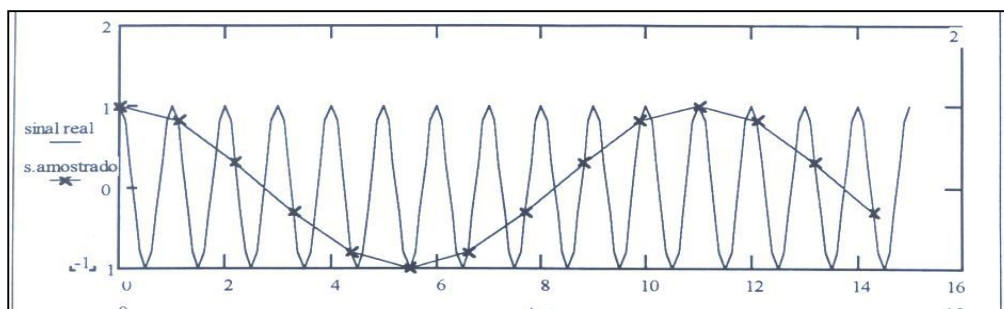


Figura 36 – *Aliasing*, neste caso, a frequência de amostragem é inferior à do sinal, o que ocasiona uma incorrecta interpretação da frequência deste

Temos, então, a frequência de *Nyquist*:

$$f_{amostragem} = \frac{N(n^{\circ} \text{ leituras})}{T_a(\text{período} - \text{amostragem})} \geq 2 f_{máx} = f_{nyquist} \quad (3.4)$$

O filtro Anti-Alias, à semelhança de qualquer outro filtro *Low-Pass*, não elimina as frequências imediatamente superiores que se encontram junto ao limite.

O processo de amostragem deve conter suficientes pontos para ser possível identificar todas as frequências de interesse contidas no sinal no tempo em análise.

¹¹ Picket fence effect é um erro da FFT que está relacionado com a escala de frequência escolhida

A primeira forma da transformada é transformar um sinal contínuo no tempo num espectro de frequência contínuo, podendo-se aplicar a todos os sinais. [56]

3.1.5.2 Windowing – Efeitos do tipo de janela

Efeitos da Janela são alterações que se verificam no espectro de frequência, devido à forma como o algoritmo FFT trata as descontinuidades do sinal amostrado.

Qualquer sinal, para ser analisado, tem de ser um registo finito. A esta operação chamamos de conversão analógica digital, que não é mais que a amostragem do sinal, segundo determinada frequência de leitura.

Como não nos é possível controlar a coincidência do comprimento da amostra com o período do sinal analógico, é perfeitamente natural a ocorrência de descontinuidades. Uma vez que o algoritmo FFT pressupõe que o registo corresponda, exatamente, a um período de um sinal infinitamente longo, torna-se necessária a atenuação dos extremos do registo, ação esta que é conseguida pela passagem do sinal por uma janela adequada.

A escolha do tipo de janela condiciona o efeito já referido. Adotar a janela retangular é o mesmo que não aplicar qualquer janela, no caso de sinais estacionários, especialmente aqueles com componentes em frequência discretas, esta é uma escolha muito má, a boa escolha para sinais estacionários é aquela que é igual a zero em cada extremidade e cuja amplitude varia suavemente.

O processo matemático (FFT) para calcular as amplitudes e as frequências das componentes presentes no sinal no tempo digitalizado exige que a amplitude no início e no fim da amostra seja nula. [46]

Se tal facto não acontecer¹², o cálculo matemático referido incluirá frequências e respetivas amplitudes que, na realidade, não existem no sinal real.

Assim, o processo exige que o sinal seja periódico, dentro do intervalo da amostra, de forma a que na amostra seguinte, o sinal não apresente descontinuidades.

Estas são interpretadas no processamento da FFT como frequências moduladas – bandas laterais, as quais, na realidade, não existem. Este problema é resolvido por um circuito eletrónico que multiplica o sinal dentro da amostra, por uma função (*Windows*) cujo efeito se traduz por forçar o sinal a zero nos limites da amostra.

O erro de *Windowing* pode ser reduzido se escolhermos a janela adequada. As janelas são aplicadas consoante a aplicação ou tipo de sinal analisado.

Uma das janelas mais utilizadas na medição de vibrações periódicas é a janela *Hanning*, pois a função desta é conseguir que as amplitudes do espectro estejam mais próximas dos seus valores verdadeiros e reduzir o número de componentes falsas do espectro. [46]

A razão deste nome deve-se ao facto de a parte amostrada do sinal ser como a parte do sinal real que vimos através de uma janela.

¹² valor zero nos limites da amostra

Diferentes tipos de Janelas:

Rectangular – É bastante útil em termos de frequência, mas bastante fraca em termos de amplitude; utiliza-se para sinais transientes curtos, ou em análise por ordens;

Flap-top – Apresenta uma boa precisão em termos de amplitude, mas fraca precisão em termos da frequência; utiliza-se para sinais com frequências discretas;

Kaiser-Bessel – Função que apresenta resultados fracos, quer em termos de frequência quer em termos de amplitude, é uma função pouco usada. A sua utilização serve para a separação de picos adjacentes, ou seja, separar duas componentes muito próximas e de amplitude muito diferente;

Hanning – A sua função é mais usada na recolha de dados por rotina, pois estabelece um compromisso entre a precisão em amplitude e em frequência muito satisfatórios. É muito rápida e consegue que as amplitudes do espectro sejam próximas dos seus valores verdadeiros, reduzindo o número de componentes falsos; utiliza-se para sinais contínuos;

A melhor escolha da função windows dependerá do tipo de sinal a tratar e dos objetivos da análise a efetuar posteriormente.

3.1.6 – A análise de valor global

O valor global permite acompanhar o estado de condição de uma máquina, este consiste na medição da velocidade eficaz através da técnica descrita anteriormente (RMS) num intervalo de frequências entre 10 e 1 kHz. Também é possível calcular o valor global nas unidades de deslocamento ou aceleração. Este será um valor indicador sobre o estado geral da máquina, mas infelizmente não consegue identificar as frequências de defeito dominantes.

É o valor do nível global de vibrações que irá ser comparado com valores de referência existentes em normas de severidade. Os critérios de severidade definidos para a monitorização de aerogeradores baseiam-se nas normas ISO 10816 e VDI 3834.

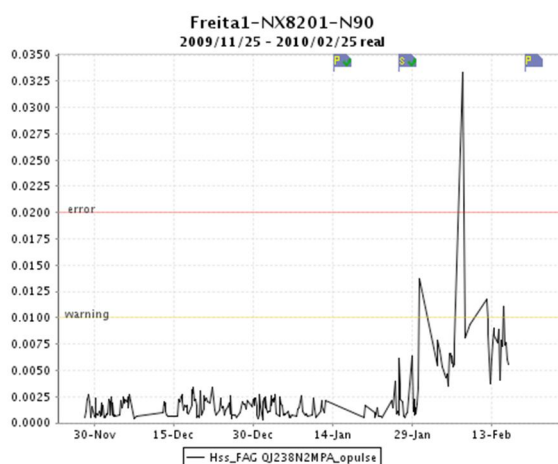


Figura 37 – Registo dos valores globais ao longo do tempo

3.1.7 – A análise de espectral

Uma das ferramentas no controlo de condição é análise de vibrações, esta só será possível de realizar através da análise espectral ou pelo nível global de vibrações. Através desta ferramenta é possível detetar a maior parte das avarias ainda na sua fase incipiente e a grande vantagem é a monitorização do estado de condição do equipamento sem ser necessário a sua paragem.

A análise de vibrações (espectro de frequências) permite diagnosticar problemas tais como desequilíbrios, desalinhamentos, defeitos em rolamentos, em engrenagens, folgas, entre outros.

Na análise espectral destacam-se algumas sintomatologias de falhas típicas em aerogeradores, tais como o desequilíbrio que se caracteriza por uma componente elevada à velocidade de rotação ou seja, a primeira harmónica (1xRpm), no espectro não se registam outras frequências diferentes de 1xRpm com amplitudes significativas, a amplitude varia com a velocidade e normalmente apresenta maior amplitude de vibração nas medições de direção radial (posição vertical ou horizontal).

No espectro de frequências, o desalinhamento caracteriza-se pela presença da componente elevada a 1x Rpm e 2x rpm. Em geral, quando a amplitude da vibração axial é maior que a metade da leitura radial mais alta, existem fortes indícios de problemas de alinhamento ou de empeno de veios, a vibração horizontal poderá ser muito diferente da vertical. A vibração provocada pelo desalinhamento ao contrário do desequilíbrio não varia com a velocidade.

A análise ao ângulo de fase serve para distinguir uma situação de desequilíbrio do desalinhamento.

Existem folgas inerentes e necessárias em todas as máquinas, por conseguinte é normal encontrar vibrações a 2 x RPM, sempre que algum desequilíbrio ou desalinhamento se encontre presente. Num espectro de frequências que existam harmónicas de 1xRpm até 10XRpm é muito provável estarmos na presença de desaperto e folgas. [32]

Quanto à sintomatologia dos defeitos em engrenagens e rolamentos, já foi descrita no capítulo anterior.

3.1.8 – A análise de tendência

Através de um registo no tempo dos valores globais da amplitude da vibração torna-se possível prever a data provável em que o equipamento atingirá o nível de amplitude máximo admissível. Para tal recorre-se à curva de análise de tendência e verifica-se quando é que esta atinge o nível máximo admissível, através deste gráfico de tendência é possível definir valores de referência, criar alarmes de alerta e perigo (falha iminente). Através da curva de tendência, realiza-se uma previsão da data de ocorrência de níveis de falha programando-se assim as intervenções de manutenção com a devida antecedência.

A análise de tendência é uma metodologia altamente aconselhada.

Os valores seguidos na análise de tendência podem ser o nível global ou uma determinada frequência do espectro FFT.

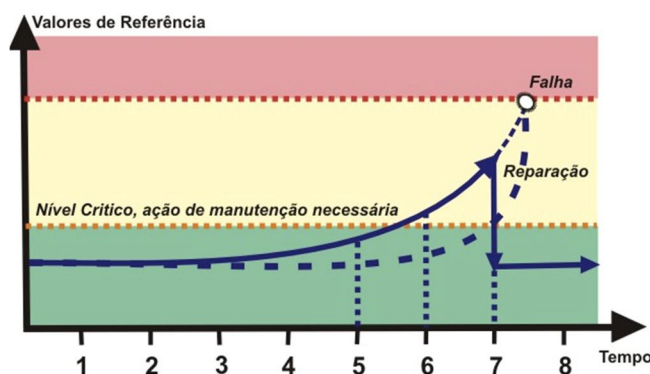


Figura 38 – Curva de tendência

3.1.7 – Importância do conhecimento das características dinâmicas da estrutura

Se a frequência da força externa coincidir com a frequência natural do sistema, este entra em ressonância, o que provocará oscilações de grande amplitude, que poderão originar roturas no material. É normal haver ressonâncias no aerogerador devido ao facto de estes estarem assentes numa estrutura com cerca de 80m de altura.

As frequências de ressonância de um sistema mecânico ou de uma estrutura são as frequências às quais ela vibra com amplitude máxima em resposta a uma força de excitação.

Todos os componentes estruturais de um equipamento têm uma frequência natural. Quando se bate num sino, este vibra livremente à sua frequência natural até que as suas características internas de amortecimento reduzam a amplitude de vibração a zero [30].

As ressonâncias, chamadas de estruturais, estão relacionadas com os componentes fixos da máquina como as chumaceiras, as fundações e o suporte.

Existem várias formas para se proceder à correção da vibração ressonante. Uma delas é através da alteração das condições da força excitadora, fazendo com que a sua frequência deixe de coincidir com a frequência natural da máquina ou da estrutura. Se não for possível alterar a frequência da força excitadora, podemos modificar a frequência natural do sistema, alterando a rigidez ou a massa da máquina. Portanto, a frequência natural pode ser modificada, através do incremento ou da diminuição da rigidez ou da massa do sistema [30].

Podemos concluir, portanto, que é de extrema importância conhecer as frequências naturais para, por um lado, evitar as ressonâncias e, por outro, analisar a integridade da estrutura através da sua variação.

3.2 – Análise de óleos

Existem vários tipos de análise aos óleos desde físico-químicas, degradação, contaminação e utilização de técnicas de ferrografia e espectrometria de infravermelhos (FTIR), traduzindo-se numa poderosa estratégia para a identificação prematura de problemas em sistemas lubrificados, pois permitem entender as alterações químicas que ocorrem no lubrificante e que, muitas vezes, estão na origem da avaria. Na ferrografia é possível determinar a presença de quantidades significativas de partículas ferrosas de desgaste de média dimensão mas severamente oxidadas, revelando a presença dos mecanismos de oxidação [41].

A análise de lubrificantes é uma ferramenta importante na monitorização de equipamentos em modo proactivo, permitindo assim aumentar a sua fiabilidade, se a análise de lubrificantes for bem implementada e realizada, os seus resultados fornecem um conjunto de informações preciosas para capacitar o pessoal da manutenção a aumentar os rácios de disponibilidade e diminuir os tempos de avaria. A validade da informação obtida na análise aos óleos depende amostragem, esta deverá obedecer a um conjunto de requisitos tais como retirar a amostra sempre do mesmo ponto, normalmente antes do filtro, a amostra do óleo deve ser retirada ainda com o óleo quente e deverá ser guardada num frasco de vidro transparente incolor, acompanhada da informação referente ao lubrificante utilizado na máquina, horas de funcionamento, data de recolha e código do aerogerador.

As análises de óleo das caixas multiplicadoras são efetuadas semestralmente, embora se possam realizar análises intermédias sempre que se verifiquem situações que exijam um maior controlo ou outro qualquer motivo. Anualmente realizam-se as análises ao óleo hidráulico, já o óleo das caixas de Pitch e Yaw não é monitorizado através de análises, pois este óleo é substituído com um intervalo de 5 anos.

3.2.1 – Interpretação de Resultados

Na interpretação de resultados provenientes das análises de óleos podemos considerar que os seus resultados fornecem um conjunto de informações quanto aos elementos detetados, sendo que a presença de Ferro, Cobre, Níquel, Estanho, Chumbo, Zinco e Alumínio, indicam desgaste, normalmente provenientes dos rolamentos e engrenagens. Elevados níveis de Cálcio, Magnésio, Silício, Potássio, Sódio, Tungsténio e água indicam contaminação. O estado de condição de um óleo lubrificante é verificado através da viscosidade (resistência ao deslizamento interno das moléculas num fluído) e do índice de viscosidade (relação da variação da viscosidade com a temperatura).

Os valores dos aditivos como Molibdénio, Magnésio, Boro, Fósforo, Zinco, Silício e Enxofre também são indicadores da condição do óleo.

A acidez de um óleo lubrificante é devido ao facto de existirem ácidos orgânicos resultantes da oxidação, sendo esta originada pela presença de água, ou partículas de desgaste como Cobre e Ferro que atuam como catalíticos, para se avaliar a oxidação utiliza-se o TAN (Total Acid Number).

O número e dimensão das partículas detetadas na análise ao óleo lubrificante apresentam três dígitos, correspondendo à concentração de partículas maiores de 4, 6 e 14 micron, para um óleo novo

ficou definido pela norma¹³ o valor de - /17/14, o 17 corresponde ao intervalo de 640 a 1300 partículas por milímetro do fluido, 14 pertence ao intervalo de 8 a 160 partículas [49].

Parâmetro	Satisfatório	Insatisfatório
Água	0,05%	> 0,10%
Sedimentos	----	Visível
AN (Acid Number)	Aumento 40%	>75%
Viscosidade	Variação 10%	>20%
Ferro (ppm)	75-100	>200
Cobre (ppm)	50-75	>75
Silicone (ppm)	Aumento 15-20	>20
ISO 4406:1999	-/17/14	-/18/15

Tab. 3 – Valores limite da análise de óleos lubrificantes para caixas multiplicadoras de aerogeradores [49]

3.3 Endoscopia

Endoscopia é um exame visual com o auxílio uma câmara vídeo técnica, que permite a visualização do estado de condição em caixas multiplicadoras e rolamentos. Não se conhece outra técnica que permita realizar de forma rápida e fiável a inspeção visual a áreas de difícil acesso, além de permitir a visualização da estrutura interna dos objetos, a endoscopia oferece a possibilidade de verificar em que condição se encontram as rodas dentadas e até mesmo a condição do óleo (no caso de existirem condensações fig.39). O tempo de paragem de aerogeradores será reduzido se os componentes defeituosos forem detetados atempadamente.



Figura 39 – Endoscopia realizada no interior de uma caixa multiplicadora – Fenómeno condensação

¹³ ISO 4406:1999

Para as inspeções realizadas foi utilizado equipamento que permite a inspeção visual e captura de imagens a 360°, possibilitando também dimensionar as descontinuidades em comprimento, área e profundidade. A sonda pode ser introduzida em diferentes meios, óleo, água e ar.

A grande vantagem destes equipamentos é a possibilidade de inspeção a diversos componentes do equipamento sem a necessidade de desmontagem.



Figura 40 – Câmera para a realização das endoscopias



Figura 41 – Imagens obtidas através da câmara de endoscopia

Capítulo 4

Caso Estudo Parque Eólico Freita e Lousã

4 - Caso Estudo Parque Eólico Freita e Lousã

4.1 - Introdução

Neste capítulo, serão tratados dois casos de estudo referentes aos parques eólicos da Freita e da Lousã, que possuem, respetivamente, 8 e 20 aerogeradores. Ambos apresentam uma taxa de avarias significativamente elevada quando comparados com outros parques com a mesma data de instalação. Tendo em conta que um parque eólico é projetado para uma duração aproximada de vinte anos, estes dois parques apresentaram, num curto espaço de tempo, não só uma taxa de avarias bastante elevada, como inclusive dois tipos de falhas graves nas caixas e rolamentos, que impediram o seu normal funcionamento.

No que diz respeito ao parque da Freita, os seus aerogeradores, nos primeiros três anos de vida, apresentaram problemas a nível das caixas multiplicadoras e dos rolamentos do veio de alta velocidade.

Relativamente ao parque eólico da Lousã, não houve necessidade de reparações nas caixas multiplicadoras, mas ocorreram substituições consecutivas dos rolamentos na zona do acoplamento, no veio de saída da caixa, bem como na entrada do gerador.

Importa referir que os procedimentos de manutenção condicionada, anteriores ao presente estudo, apenas tinham em conta a análise de óleos semestrais e endoscopias. Durante o presente trabalho monitorizaram-se as vibrações e relacionaram-se os resultados com análises de óleos e registos de paragens súbitas.

Além disso, decorreram longos intervalos entre a recolha da amostra dos óleos e a respetiva entrega de resultados, o que contribui, significativamente, para o agravamento das falhas. De facto, estes procedimentos são realizados por uma empresa holandesa, que acompanhada pela Nordex, recolhe amostras de norte a sul do país, decorrendo, entretanto, vários meses até que os resultados sejam entregues.

Mais ainda, tendo o objetivo de se compreender os motivos destas falhas precoces, foi decidido instalar sistemas de monitorização *on-line* (CMS) nos dois parques, visto não ser possível recolher dados de vibrações de outra forma, devido ao impedimento dos técnicos se encontrarem no interior da *nacelle*, quando o aerogerador se encontra em funcionamento.

O presente estudo incidiu sobre a análise de vibrações como ferramenta no diagnóstico antecipado de avarias e, para o complementar, realizámos, por um lado, um levantamento das avarias, dos tempos de paragem, da produção, das substituições precoces de óleo e dos diferenciais térmicos. E, por outro, verificámos o registo dos ventos sentidos nos dois parques, na tentativa de relacionar os fatores externos com as avarias assinaladas.

Os resultados dos dois casos de estudo são apresentados de forma diferente, apesar de em ambos terem sido analisados os mesmos parâmetros. Na Freita são apresentados os gráficos da análise aos óleos e amplitudes térmicas, onde se registaram alterações na qualidade do óleo, enquanto na Lousã essas alterações não se verificaram.

4.2 - Caso de Estudo do Parque Eólico da Freita

O parque eólico da Freita opera desde 2006, com oito aerogeradores da marca/modelo Nordex N90-R80 (2.3 MW). Mede 80 m de altura de torre e apresenta um diâmetro do rotor de 90 m. A *nacelle* pesa 97 ton, o rotor pesa 52 ton e a torre pesa 179 ton [62].

A caixa multiplicadora tem uma relação de 1:77; a rotação de entrada é de 14,9 RPM e a velocidade de saída é de 1 160 RPM. Pesa 19 600 kg. Foi produzida pelo fabricante Eickhoff e o lubrificante utilizado é o MobilGear SHC XMP 320.

Neste parque, foram contabilizadas unicamente as avarias relacionadas com intervenções nos rolamentos ou nas caixas multiplicadoras (tabela 4).

Avarias do parque 2008-2011									
Aerogeradores (Wind Turbine WT)									TOTAIS
	Wt1	Wt2	Wt3	Wt4	Wt5	Wt6	Wt7	Wt8	
2008	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2009	0	1	0	0	1	0	0	0	2
2010	2	0	1	1	0	1	1	0	6
2011	1	1	1	0	0	0	0	0	3
TOTAIS	3	2	2	1	1	1	1	0	11

Tab. 4 - Registo das avarias do parque eólico da Freita

Proceder-se-á, de seguida, à análise dos dados referentes aos oito aerogeradores, começando pelo aerogerador n.º 1. E, a propósito do registo de avarias, enfatizaremos a substituição de rolamentos e a caixa multiplicadora a fim de se conhecer as suas causas e efeitos.

Por último, é de referir a nossa preocupação em conseguir criar uma base de dados nacional, tendo, para o efeito, sido registados todos os valores correspondentes a níveis de vibração e ao estado do óleo no momento da avaria. Além disso, não foi descurada a catalogação fotográfica de todos os componentes substituídos.

Para avaliação do estado de condição do óleo foram considerados valores de referência indicados na tabela 3.

4.2.1 - Aerogerador Nº1

Na tabela seguinte são mencionadas intervenções e avarias registadas no aerogerador nº1.

Turbina	Data	Empresa	Tipo Intervenção
Turbina 1 (NX8201)	08/11/17	WindParkService	Substituição do óleo
	09/05/13	Nordex	Instalação CMS
	09/05/16	Nordex	Inspeção Caixa Multiplicadora
	10/03/05	Eichkoff	Substituição Rolamentos HS
	10/03/09	Nordex	Substituição do óleo
	10/03/02	Eichkoff	Inspeção Rolamentos HS
	10/07/15	Eichkoff	Inspeção Caixa Multiplicadora
	10/08/02	Nordex	Substituição da Caixa Multiplicadora
	11/02/18	Eichkoff	Substituição Rolamentos HS
	11/10/21	Iberwind	Recolha amostra óleo caixa
	11/11/01	Iberwind	Inspeção Caixa Multiplicadora

Tab. 5 - Registo das intervenções no aerogerador 1

Após a instalação do CMS, foi efetuada uma endoscopia a 16 de maio de 2009 (fig. 42), com o objetivo de se conhecer o estado de condição atual da caixa multiplicadora em diferentes zonas, mas nada de anormal foi encontrado.

Para efetuar a referida inspeção, utilizou-se um equipamento portátil constituído por um LCD, uma microcâmara orientável comandada por um *joystick* externo e um processador para guardar as diferentes imagens.

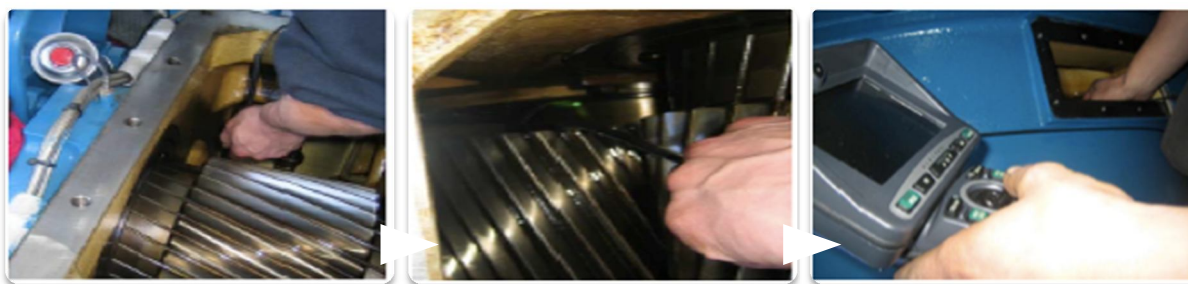


Figura 42 - Endoscopia Aerogerador nº1

4.2.1.1 - Vibrações no aerogerador Nº1

No início de 2010, surgiu um alarme proveniente do CMS, como está representado na figura 43, que mostra o registo dos valores globais em (raw) medidos no sensor do rolamento (pista externa) do veio de alta velocidade (HSS), na saída da caixa multiplicadora. Estes valores de alarme foram definidos pelo fornecedor de CMS em conjunto com o fabricante do aerogerador, baseados nas normas.

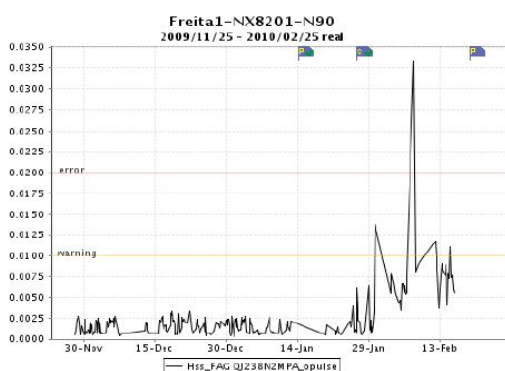


Figura 43 – Registo de valores globais no sensor do veio de alta velocidade saída da caixa multiplicadora

De forma a identificar as frequências de defeito do rolamento de alta velocidade no espectro, é necessário recorrer a cálculos, utilizando as fórmulas descritas no capítulo anterior.

Dados cinemáticos (rolamentos da caixa multiplicadora HSS) e Engrenamento			2X	3X	4X
BPFI	Pista Interna	65 Hz	130 Hz	195Hz	260Hz
BPFO	Pista Externa	49,6 Hz	99,3 Hz	148Hz	198,5Hz
BSF	Esfera	31 Hz	62 Hz	93 Hz	124Hz
FTF	Gaiola	9 Hz	18Hz	27Hz	36Hz
TMF	Freq. Engrenamento	34,5 Hz	69 Hz	103,5	

Tab. 6 – Dados cinemáticos do rolamento do veio de alta velocidade à saída da caixa

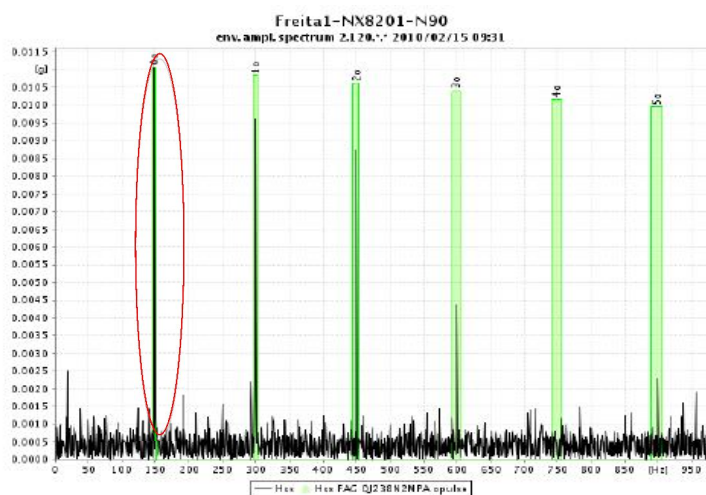


Figura 44 - Espectro (envolvente) de vibrações do rolamento do veio de alta velocidade

Dado o alarme de vibrações, e após a análise do espectro (envelope), verifica-se a presença da frequência de falha na pista externa, com o intuito de verificar os valores registados pelo CMS, procedeu-se à realização de uma endoscopia. Como se pode observar na figura 45 b), o estado de condição do rolamento era crítico.



Figura 45 - Endoscopia ao rolamento a) bom estado b) nível avançado degradação,

Uma vez confirmados os valores de vibração, causados pelo aparecimento de componentes espectrais à frequência de falha do rolamento do veio de alta velocidade, foram providenciados, de imediato, todos os meios para se proceder à substituição do referido rolamento (fig. 46).

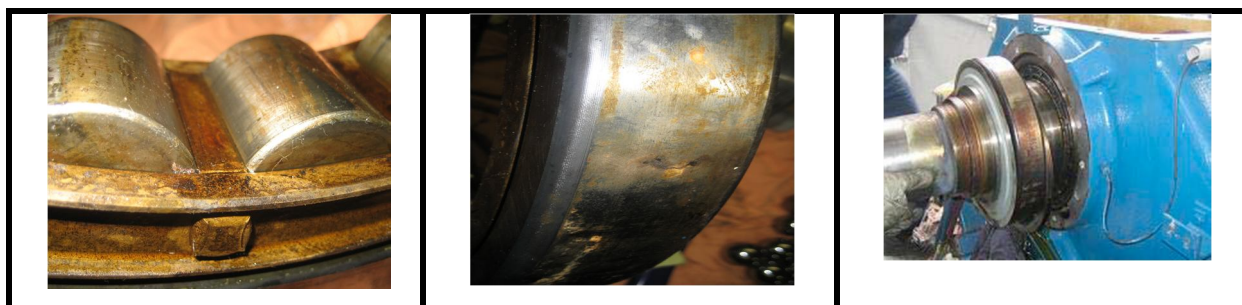


Figura 46 - Substituição do par de rolamentos na saída da caixa (veio alta velocidade)

Para se compreender melhor o funcionamento interno da caixa multiplicadora e para se conseguir ajustar os valores de alarme do CMS e os valores de análise do óleo, foram registados os parâmetros físico-químicos referentes à análise do óleo (fig.50) nas datas imediatamente anteriores à substituição do rolamento do veio de alta velocidade à saída da caixa multiplicadora.

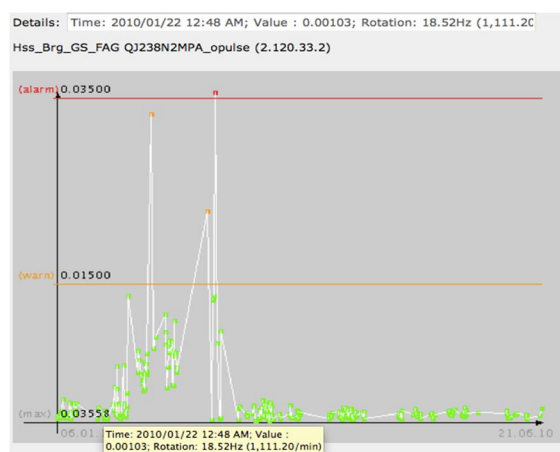


Figura 47 – Valores globais no veio de alta velocidade

Através do gráfico (fig.47) é possível observar um aumento dos valores globais do rolamento do veio de alta velocidade durante o mês de Fevereiro de 2010. Após a substituição do mesmo os valores baixaram para valores normais.

Durante o mês de Julho surgem novos alarmes de vibrações, nesta data relacionadas com a caixa multiplicadora. Através do espectro de frequências é possível observar a frequência de engrenamento com uma amplitude mais elevada que as restantes. Após este alarme a caixa multiplicadora foi inspecionada através da endoscopia, tendo como resultado a sua substituição em agosto de 2010, justamente no mês em que há menor índice de produção.

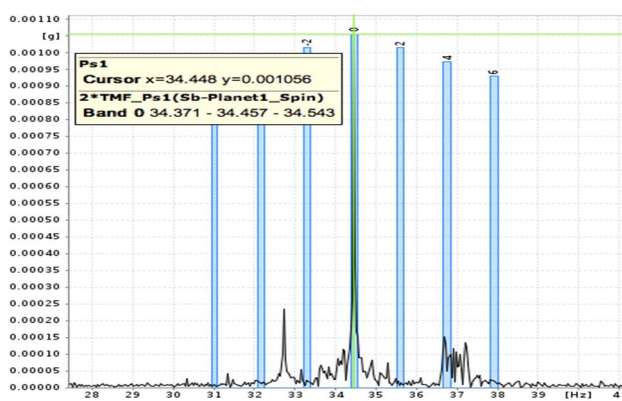
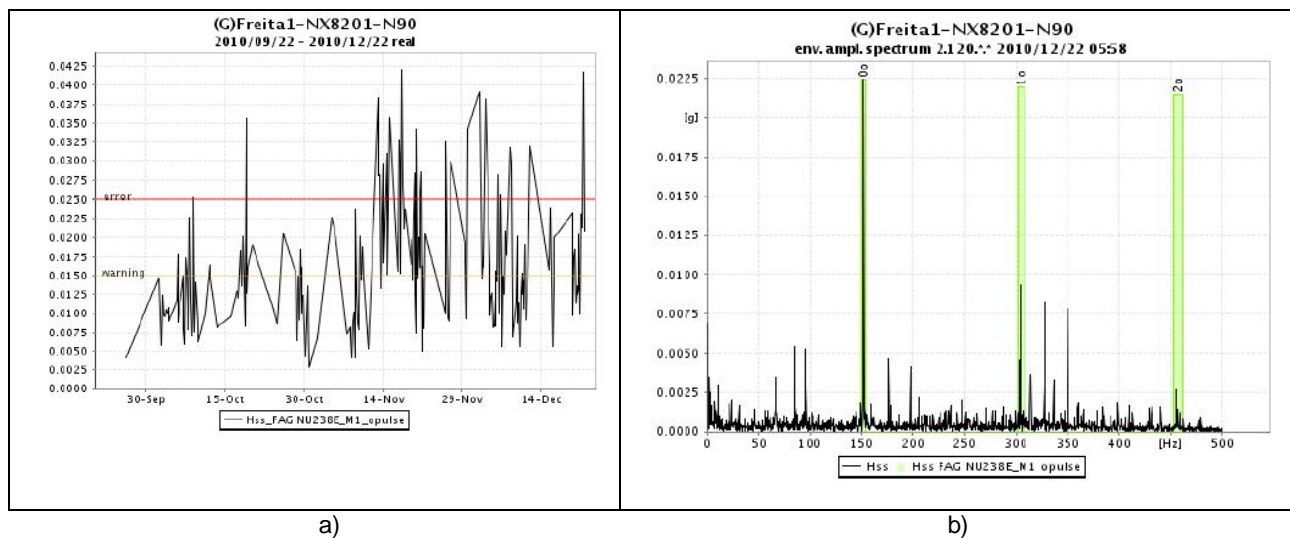


Figura 48 - Espectro de vibrações na caixa multiplicadora nº1

Com o objetivo de se conseguir identificar a frequência de engrenamento do estágio helicoidal intermédio, contabilizaram-se o número de dentes $Z_1 = 122$ (ver anexo D-4).

A velocidade de rotação no momento da recolha era de 16,8 RPM (0,28 Hz), que após multiplicado pelo número de dentes obtém-se a frequência de engrenamento para o segundo estágio $TMF = 122 \times 0,28 = 34,16$ Hz (tab.6).

Em setembro do mesmo ano, no rolamento do veio de alta velocidade, surgiram valores de vibrações próximos dos valores do nível de “aviso”, como pode ser observado na figura 49 a), em novembro e após um aumento da produção, foram registados valores de vibração global (raw) elevados, ultrapassando por diversas vezes o alarme (linha vermelha). Em dezembro e janeiro, os valores mantiveram-se elevados, dando origem à substituição do referido rolamento em fevereiro de 2011. Na figura 49 b), a análise espectral (envolvente) mostra-nos que a origem da falha se situa no rolamento do veio de alta velocidade, na pista externa.



a)

b)

Figura 49 – Espectro (envolvente) de vibrações WT Nº1

4.2.1.2 - Análise de óleos no aerogerador Nº1

No período entre junho de 2009 e outubro de 2009 deve ser realçado o facto do cobre estar a aumentar, tendo passado de 43 para 62 ppm, indicando desgaste e corrosão, facto este perfeitamente identificado nas fotografias retiradas ao rolamento do veio de alta velocidade (fig.46).

Após a substituição do conjunto de rolamentos, procedeu-se também à troca de óleo, seguindo-se a recolha de uma amostra de óleo (em 5/2010) a fim de se compreender o estado de condição da caixa multiplicadora.

Nessa mesma recolha, foi registado que a viscosidade apresentava um valor baixo (316 mm²/s), a oxidação com valor de 2 A/cm e o valor de partículas contaminantes, inclusive o cobre apresentava valor 30 ppm. Seguiu-se a endoscopia para validar o resultado da análise de óleos, o qual foi bastante comprometedor, como se pode ver na figura 52.

Importa dizer que este conjunto de procedimentos foram definidos a fim de se testar um novo modelo de manutenção aplicado a aerogeradores, deve ser referido que não foi possível obter as datas de reposição do nível do óleo.

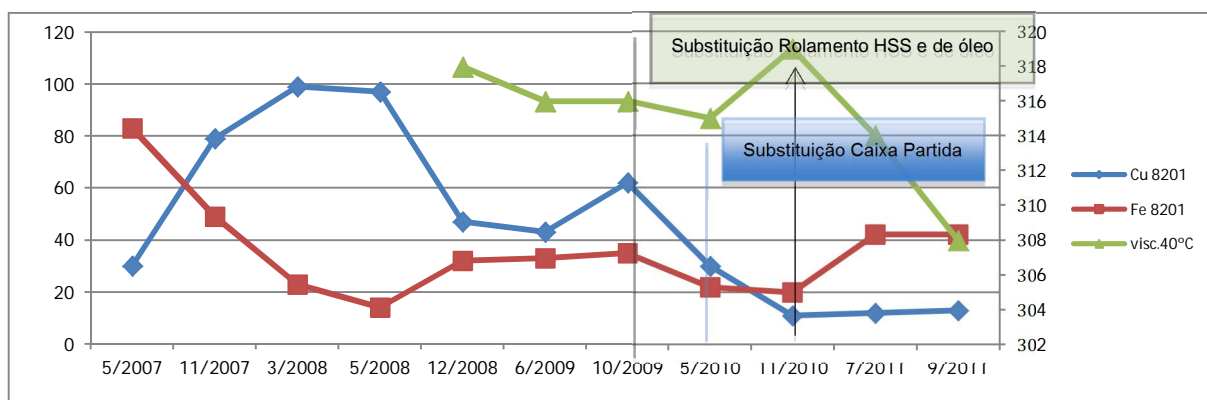


Figura 50 - Gráfico da análise de óleo WT Nº1 em ppm

No sentido de se compreender estas falhas consecutivas do rolamento (HSS), examinámos todos os fatores externos ao aerogerador, como as amplitudes térmicas e as paragens, independentemente de serem causadas por ventos superiores a 25 m/s ou por falha do sistema, que, por sua vez, origina a elevados esforços na caixa multiplicadora.

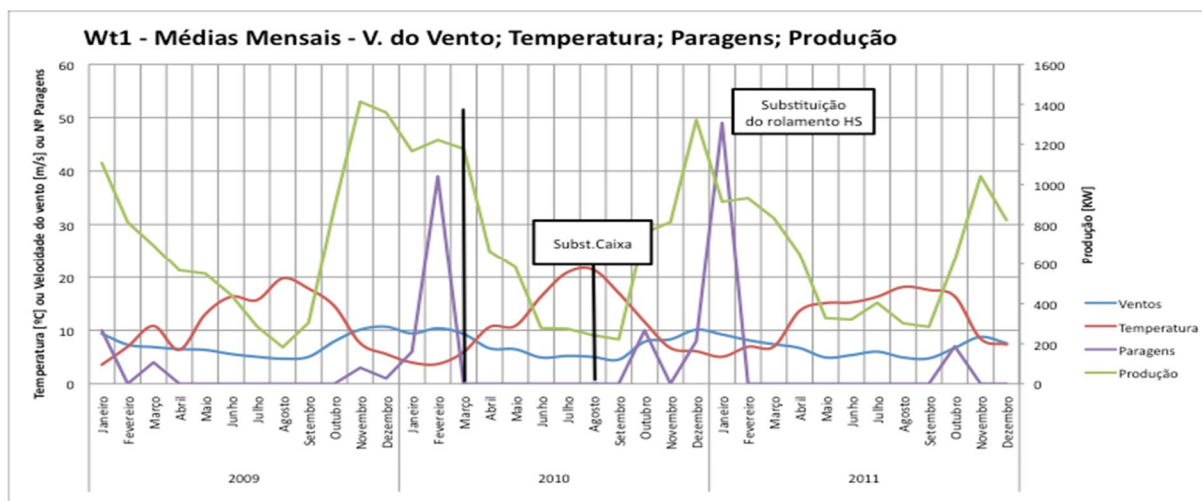


Figura 51 - Gráfico dos ventos, temperaturas, paragens e produção

Através da figura 51 é possível observar que as paragens e o aumento de produção, parecem estar relacionadas com as substituições dos rolamentos.

Na figura seguinte (fig.52), registaram-se várias imagens ao interior da caixa multiplicadora no mês anterior à sua substituição, é notória a degradação, mas também foram detetadas partículas acima dos limites definidos pela norma, esta define que os valores estão num nível não satisfatório acima de -/18/15, e os resultados três meses antecedentes à substituição da caixa apresentavam valores 22/21/17. O que significa que foram detetadas 100542 partículas com tamanho superior a 14 μm , 1310367 superiores 6 μm e 3401373 com tamanho superior a 4 μm , por cada ml de óleo.

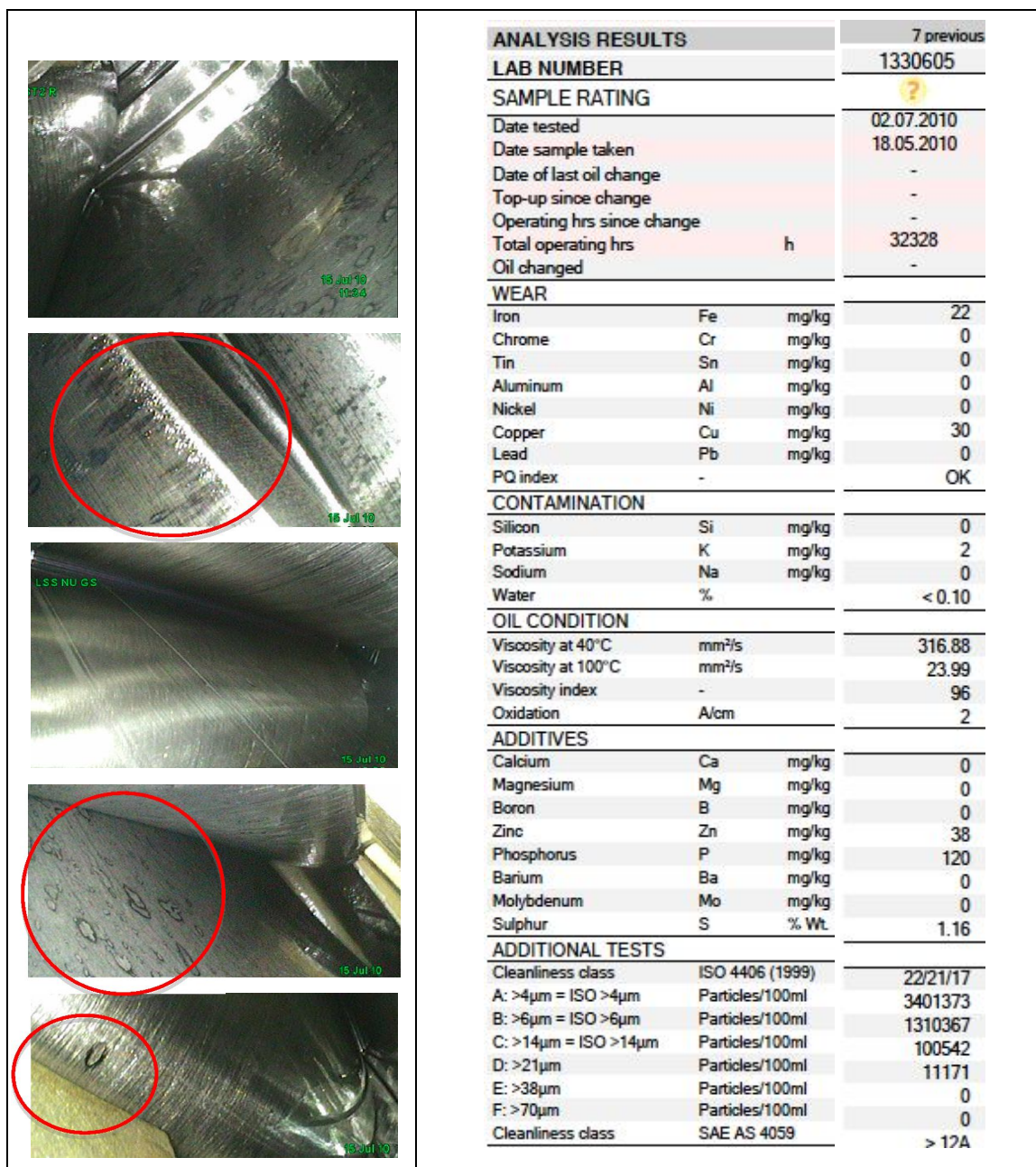


Figura 52 – Imagens do interior da caixa no mês anterior à sua substituição e valores da análise de óleos no mês de maio de 2010

4.2.1.3 - Amplitudes térmicas no Aerogerador Nº1

Para se compreender os efeitos provocados pelas amplitudes térmicas, foram realizadas médias mensais baseadas num registo diário com intervalos de 10 minutos.

Olhando para a figura 53, observamos que, durante o mês de Agosto de 2010, as amplitudes térmicas superaram os 18°C e que junho e julho de 2009 foram os meses em que se obteve o registo da maior amplitude térmica do ano.

Esta ocorrência provocou, inevitavelmente, alterações a nível da qualidade do óleo lubrificante.

Com efeito, estas amplitudes traduzem-se em condensações no interior da caixa multiplicadora, que modificam as propriedades do óleo, impedindo uma lubrificação eficiente. Por consequência, poderão ser responsáveis pela ocorrência de falhas precoces na caixa multiplicadora.

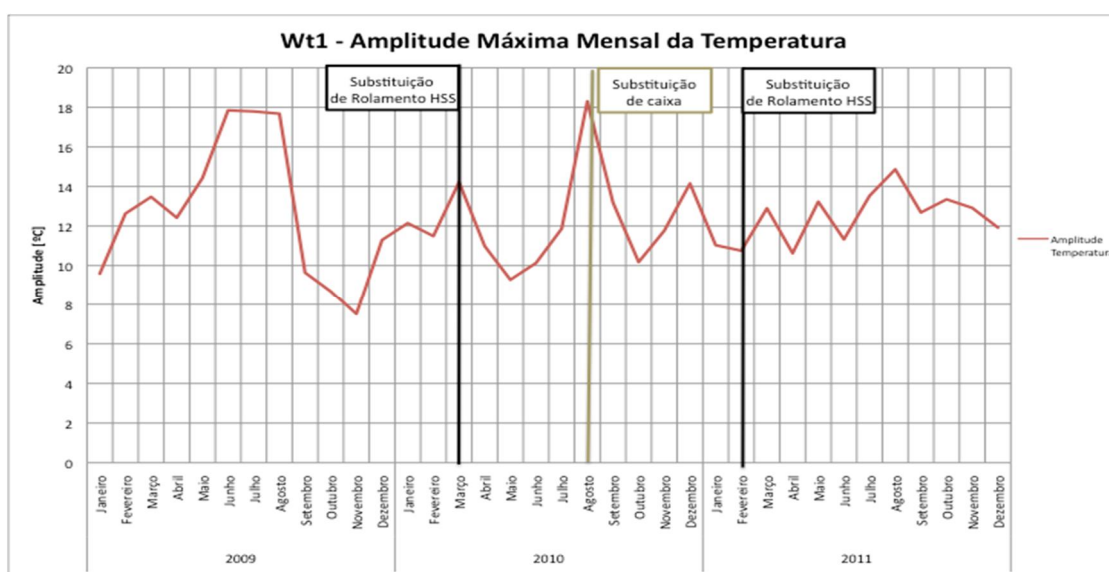


Figura 53 – Evolução de amplitude de temperatura ao longo do triénio

4.2.1.4 - Paragens forçadas no Aerogerador Nº1

Com o objetivo de se compreender a origem das falhas ocorridas no início da vida útil do aerogerador, foram contabilizadas todas as paragens de emergência por acionamento do travão, bem como as ocorridas por motivos de ventos com velocidades superiores a 25 m/s¹⁴.

A figura 54 mostra todas essas paragens registadas entre 2009 e 2011. Convém não esquecer que estas originam grandes esforços no interior da caixa, bem como no rolamento do veio de alta velocidade, não devendo ser descurado o facto de o travão de emergência estar localizado à saída da caixa multiplicadora.

¹⁴ Atente-se que um aerogerador apresenta sistemas de segurança que não permitem o seu funcionamento com ventos superiores a 25 m/s através do posicionamento adequado das pás.

Constata-se que, após sucessivas paragens, ocorrem fenómenos de fadiga mecânica, que obrigam à substituição dos rolamentos.

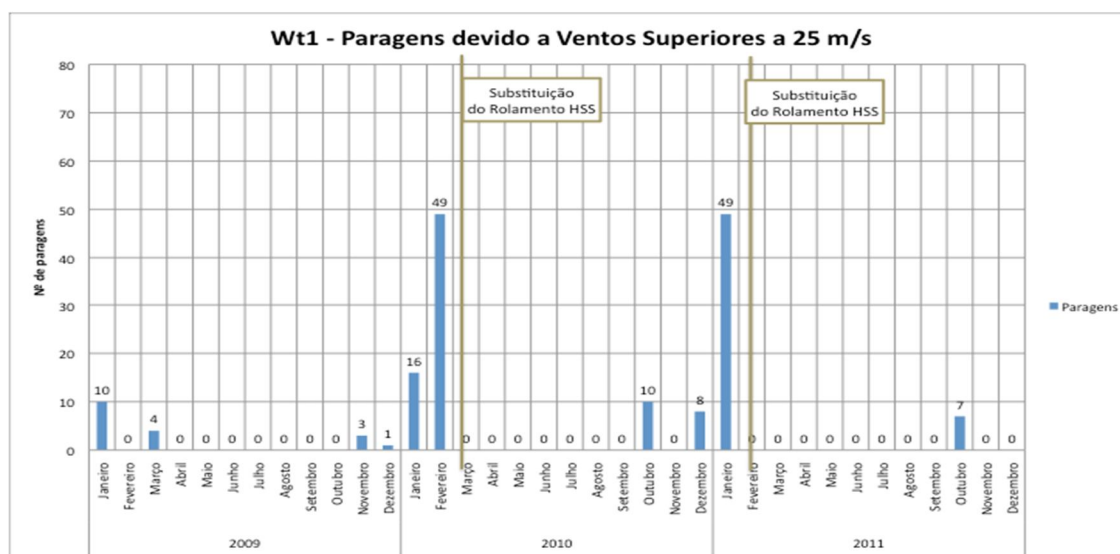


Figura 54 - Gráfico de paragens provocadas por ventos superiores a 25m/s.

Em novembro de 2011, foi realizada uma endoscopia, com a finalidade de se conhecer o estado de funcionamento da caixa multiplicadora do aerogerador n.º 1 (fig. 55).

Foram encontradas algumas marcas muito superficiais e alguma condensação, que criaram a necessidade da monitorização das vibrações¹⁵ e das propriedades do óleo com intervalos de tempo muito curtos.



Figura 55 – Endoscopia ao anel do estágio planetário

¹⁵ Recolhas semanais dos dados dos sensores localizados na caixa, com a respetiva análise espectral

4.2.1.5 - Conclusões para o Aerogerador Nº1

Analizados todos os fatores externos e internos que poderiam estar na origem das falhas precoces, conclui-se que:

- sempre que ocorrem muitas paragens devido a ventos elevados, surgem danos no rolamento do veio de alta velocidade;
- desde Maio até agosto de 2010, ocorreram as maiores amplitudes térmicas daquele ano, surtindo efeitos no óleo da caixa multiplicadora, a qual teve de ser substituída após esse período;
- o CMS é uma ferramenta fiável, que identifica perfeitamente os defeitos num estado muito inicial, permitindo conhecer a origem do defeito com grande pormenor (se é na pista interna, na externa ou na gaiola);
- a grande vantagem do CMS pode também tornar-se num problema, pois acontece que os valores de alarme introduzidos nesta ferramenta foram baseados noutros aerogeradores e, até construirmos uma base de dados que espelhe a nossa realidade nacional, deparamo-nos com substituições precoces;
- durante o período em que decorreu esta nossa investigação, foram detetadas algumas vibrações, mas a falha estava num estado muito inicial, razão pela qual importa ajustar esses alarmes.
- Nos resultados das análises aos óleos raramente são mencionados aspetos importantes tais como, as reposições do nível e a sua substituição.

4.2.2 - Aerogerador Nº2

Na tabela seguinte, encontram-se registadas as intervenções e as avarias ocorridas no n.º 2.

Turbina	Data	Empresa	Tipo Intervenção
Turbina 2 (NX8202)	08/04/12	Nordex	Substituição filtro óleo caixa
	09/01/16	Eichkoff	Inspeção Caixa Multiplicadora
	09/02/20	Nordex	Substituição da Caixa Multiplicadora
	09/02/24	Nordex	Fuga de óleo caixa
	09/04/07	Nordex	Instalação CMS
	10/04/28	Nordex	Fuga de óleo caixa
	11/09/22	Nordex	Recolha amostra óleo caixa
	11/10/03	3G Gearcheck	Inspeção Caixa Multiplicadora
	11/10/13	Nordex	Substituição da Caixa Multiplicadora

Tab. 7 - Registo das avarias do Aerogerador nº2

Antes da instalação do CMS, foi efetuada uma endoscopia a 16 de janeiro de 2009, com o objetivo de se saber o estado de condição da caixa multiplicadora, depois de conhecidos os resultados da análise ao óleo, que indicavam valores de ferro, cobre, zinco, fósforo e oxidação elevados, conforme indicados na tabela seguinte

Fe=50 ppm	Cu=53 ppm	Zn=60 ppm
Oxidação = 4 A/cm	ISO = 21/17/13	P=253 ppm

Tab. 8 - Contaminantes químicos do óleo a 16 Janeiro 2009

Após termos realizado a referida endoscopia, foi decidido substituir a caixa multiplicadora. Os resultados da análise ao óleo foram confirmados e constatou-se a existência de grandes falhas nos dentes das engrenagens e nos rolamentos (fig. 56).



Figura 56 - Engrenagens e rolamentos danificados

4.2.2.1 - Vibrações no Aerogerador Nº2

Não foi possível analisar os valores das vibrações imediatamente antes da rotura da caixa em 2009, visto que, nesta data, o sistema de CMS ainda não estava instalado.

No final de setembro 2011, surgiram alarmes no CMS, indicando valores de vibrações elevados provenientes do sensor da caixa multiplicadora (fig. 57).

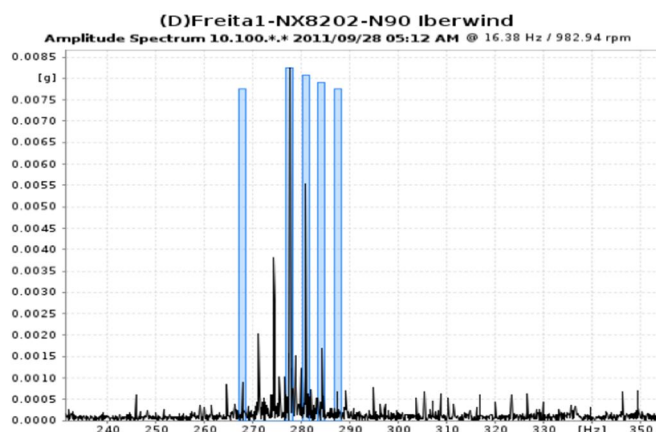


Figura 57 - Espectro de vibrações na caixa multiplicadora nº2 – sensor Gb2

Perante este espectro existem possíveis falhas a 278 Hz provavelmente no 3º estágio da caixa multiplicadora, os cálculos foram efetuados com velocidade de rotação do veio a 982,9 rpm.

Após a ocorrência do alarme de vibrações, procedeu-se à realização de uma endoscopia, com o intuito de comprovar os valores registados pelo CMS, devido à necessidade de ajustar os valores de alarme. Constatamos que o estado de condição da caixa multiplicadora apresentava um nível avançado de degradação, de modo que, não sendo possível a sua reparação, foram providenciados todos os meios para se proceder à sua substituição.

4.2.2.2 - Análise de óleos no Aerogerador N°2

Os valores dos contaminantes do óleo referentes à data imediatamente anterior à substituição da caixa encontram-se representados na figura 58.

Uma observação atenta chama-nos a atenção para os valores de ferro excessivamente altos no período compreendido entre junho de 2009 e setembro de 2011, aumentando de 40 para 111 ppm, sintoma da existência de problemas na caixa multiplicadora.

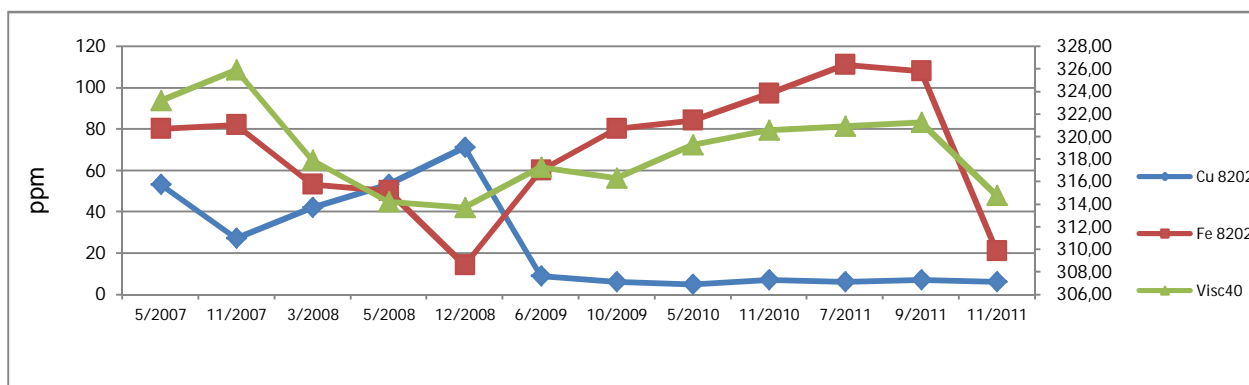


Figura 58 - Gráfico da análise ao óleo aerogerador nº2

4.2.2.3 - Amplitudes térmicas no Aerogerador N°2

Observando a figura 59, constatamos que as amplitudes térmicas superaram os 20º C durante o mês de julho de 2009. Esta ocorrência produziu efeitos sobre a alteração da qualidade do óleo lubrificante, pois, durante todo o período até à substituição da caixa multiplicadora, o óleo deste aerogerador não foi trocado, contribuindo, de certa forma, para a falha precoce da mesma.

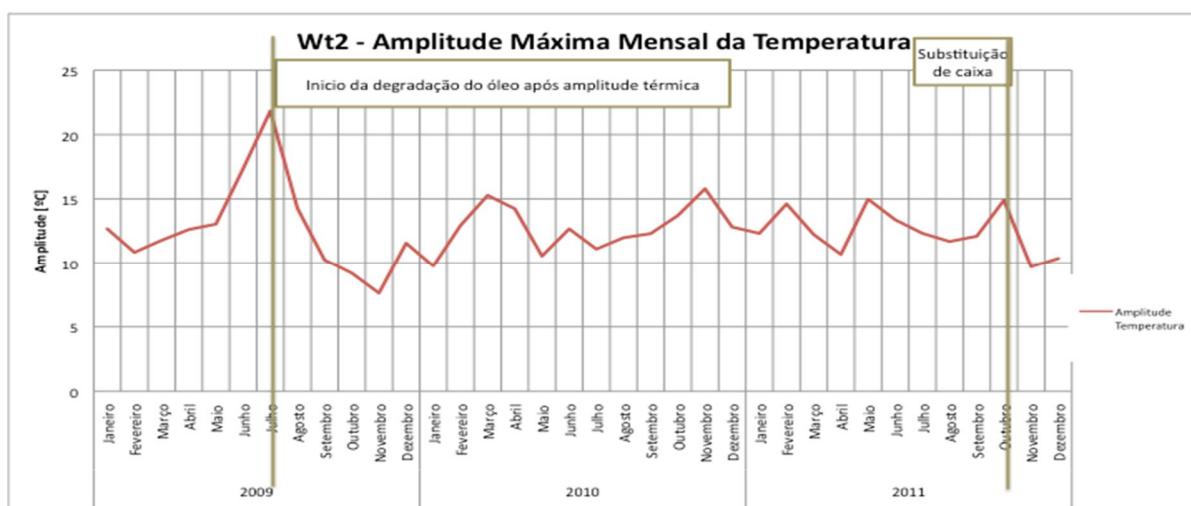


Figura 59 - Gráfico de amplitudes térmicas mensais

4.2.2.4 - Paragens forçadas no Aerogerador Nº2

Para se compreender a origem das duas falhas ocorridas na caixa multiplicadora no início da vida útil do aerogerador, foram contabilizadas todas as paragens por motivos de ventos com velocidades superiores a 25 m/s.

A figura 60 mostra todas as paragens registadas entre 2009 e 2011. Refira-se, uma vez mais, o facto de estas originarem grandes esforços no interior da caixa multiplicadora.

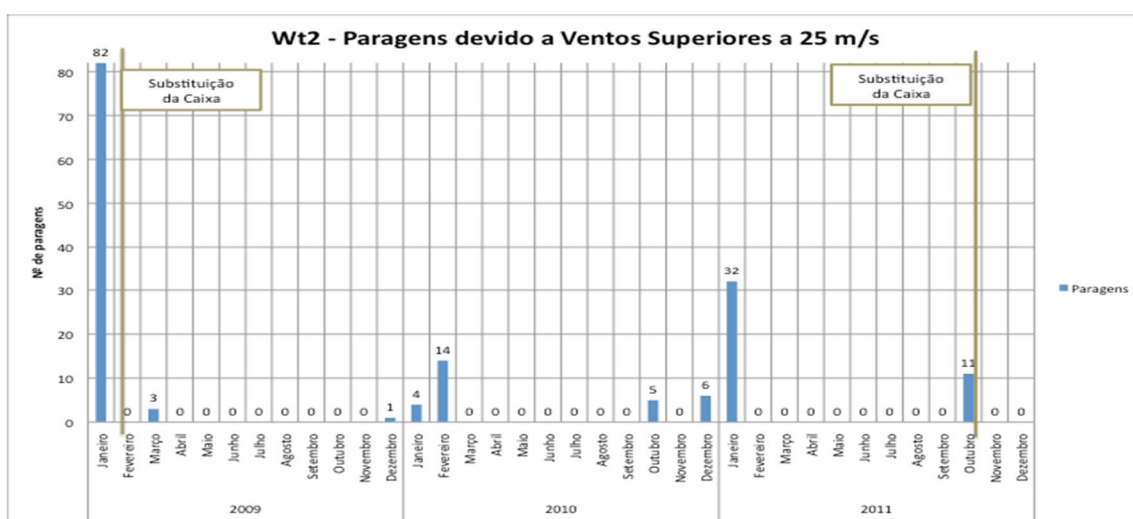


Figura 60 - Gráfico de paragens devido a ventos superiores a 25m/s

4.2.2.5 - Conclusões para o Aerogerador Nº2

A figura 60 vem mostrar-nos que as falhas e as quebras das caixas multiplicadoras estão relacionadas com as paragens súbitas provocadas por ventos superiores a 25 m/s; contudo, não deve

ser negligenciada a importância que as amplitudes térmicas assumem sobre o lubrificante, provocando a sua degradação. No verão de 2009, foram registadas amplitudes na ordem dos 22° C, enquanto, nos anos restantes, os valores situaram-se num intervalo entre os 10 e os 15° C.

Nas análises aos óleos, o valor do contaminante ferro é bastante elevado, sendo indicador de problemas nas engrenagens. No entanto, por diversos motivos, entre os quais a diferença entre as datas da recolha da amostra e a entrega dos resultados, não houve nenhuma mudança do óleo, situação que contribuiu de forma significativa para a substituição da caixa multiplicadora.

4.2.3 - Aerogerador Nº3

As intervenções e as avarias registadas no aerogerador n.º 3 encontram-se assinaladas na tabela que se segue.

Turbina 3 (NX8203)	Data	Empresa	Tipo Intervenção
	08/11/15	WindParkService	Substituição do óleo
	09/05/12	Nordex	Instalação CMS
	09/02/10	Nordex	Inspeção Caixa Multiplicadora
	10/03/15	Eichkoff	Substituição Rolamentos HS
	11/03/10	Nordex	Aplicação de solventes
	11/02/05	Nordex	Substituição Rolamentos HS
	11/04/06	Nordex	Recolha amostra óleo caixa
	11/04/22	Nordex	Aplicação de solventes
	11/04/05	Nordex	Substituição do óleo
	11/05/17	Nordex	Substituição do óleo
	11/05/20	Nordex	Recolha amostra óleo caixa
	11/10/21	Iberwind	Recolha amostra óleo caixa
	11/11/01	Iberwind	Inspeção Caixa Multiplicadora
	11/11/23	Nordex	Recolha amostra óleo caixa

Tab. 9 Tabela de registo de intervenções no Aerogerador nº3

No caso do aerogerador n.º 3, verificamos que existiu uma substituição do óleo no final do ano de 2008, o mesmo tendo ocorrido em abril e em maio de 2011.

Depois de estudados todos os parâmetros relevantes para o normal funcionamento do aerogerador, conclui-se que, quando o óleo é substituído, este mantém as suas propriedades lubrificantes nas melhores condições, evitando que a caixa multiplicadora se degrade.

Neste aerogerador não foi realizada nenhuma substituição a nível da caixa multiplicadora, contudo existiram diversas intervenções no lubrificante.

Foram registadas vibrações elevadas no rolamento do veio de alta velocidade, tendo havido uma coincidência no período de falha entre este aerogerador e o aerogerador n.º 1.

4.2.3.1 - Vibrações no Aerogerador N°3

Durante o mês de março de 2010, surgiram alarmes no CMS, indicando valores de vibrações elevados provenientes do sensor (Gb3) colocado junto do veio de alta velocidade na saída da caixa multiplicadora (fig. 50).

Os dados cinemático utilizados estão apresentados na tabela 6, visto que a velocidade de rotação é semelhante 1620 rpm.

Em Outubro de 2009, no rolamento do veio de alta velocidade, surgiram valores de vibrações próximos dos valores do nível de “aviso”, em novembro, foram registados valores de vibração global (raw) elevados, ultrapassando por diversas vezes o alarme. Em dezembro e janeiro, os valores mantiveram-se elevados, dando origem à substituição do referido rolamento em Março de 2010. Na figura 61, a análise espectral (envolvente) mostra-nos que a origem da falha se situa no rolamento do veio de alta velocidade, na pista interna.

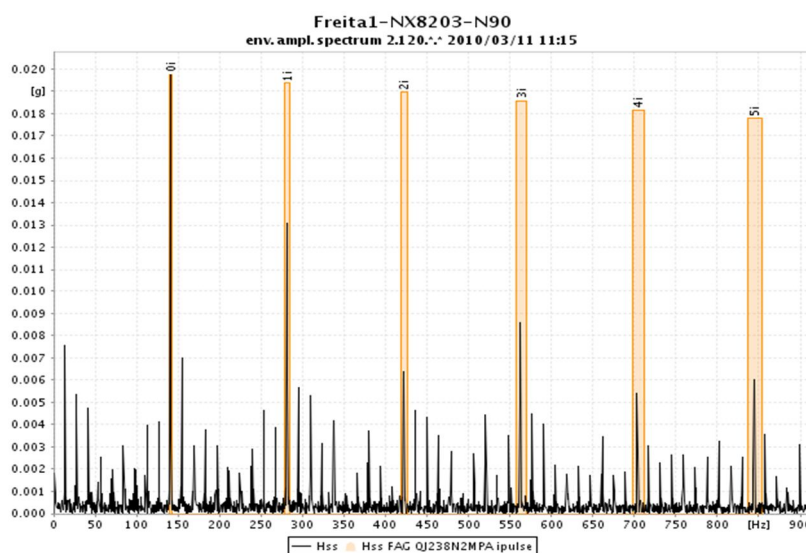


Figura 61 – Espectro (envolvente) de vibrações na caixa multiplicadora WT N°3

A seguir ao alarme de vibrações, procedeu-se à realização de uma endoscopia ao rolamento, a fim de se comprovarem os valores registados pelo CMS. Depois de substituído o rolamento verificou-se que o estado de condição do mesmo apresentava uma degradação ainda num estado inicial.

4.2.3.2 - Análise de óleos no Aerogerador N°3

Na figura 62, são apresentados os valores indicadores dos contaminantes e viscosidade do óleo relativos à data imediatamente anterior à substituição do rolamento do veio de alta velocidade. Observamos, então, que as percentagens de cobre apresentam valores superiores aos do ferro, o que é um indicador da ocorrência de problemas nos rolamentos.

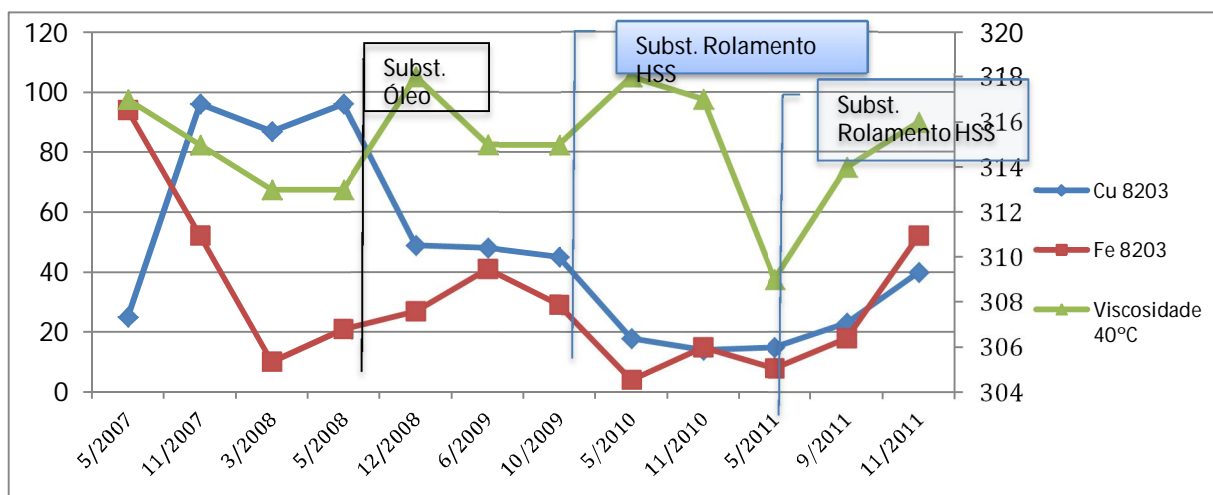


Figura 62 - Gráfico da análise ao óleo aerogerador nº3 em ppm

Ao longo do período da investigação verifica-se que, com a substituição do óleo não surgem falhas na caixa, apenas se constata que quando os valores do cobre são superiores ao ferro indica-nos que estamos perante falhas nos rolamentos e não nas rodas dentadas. Em abril e maio de 2011 verifica-se uma subida significativa nos valores registados referentes às amplitudes térmicas (fig.63), e, o valor da viscosidade atinge o valor mais baixo de ($309 \text{ mm}^2/\text{s}$), registado no período dos três anos.

4.2.3.3 - Amplitudes térmicas no Aerogerador Nº3

Uma vez mais, realizámos médias mensais baseadas num registo diário com intervalos de 10 minutos para compreendermos os efeitos provocados pelas amplitudes térmicas.

Através da figura 63, é possível observar que, durante os meses de verão, as amplitudes não ultrapassaram os 17°C . Apesar de elevadas, não tiveram efeitos negativos sobre a caixa multiplicadora, em virtude da substituição do óleo a título de medida preventiva.

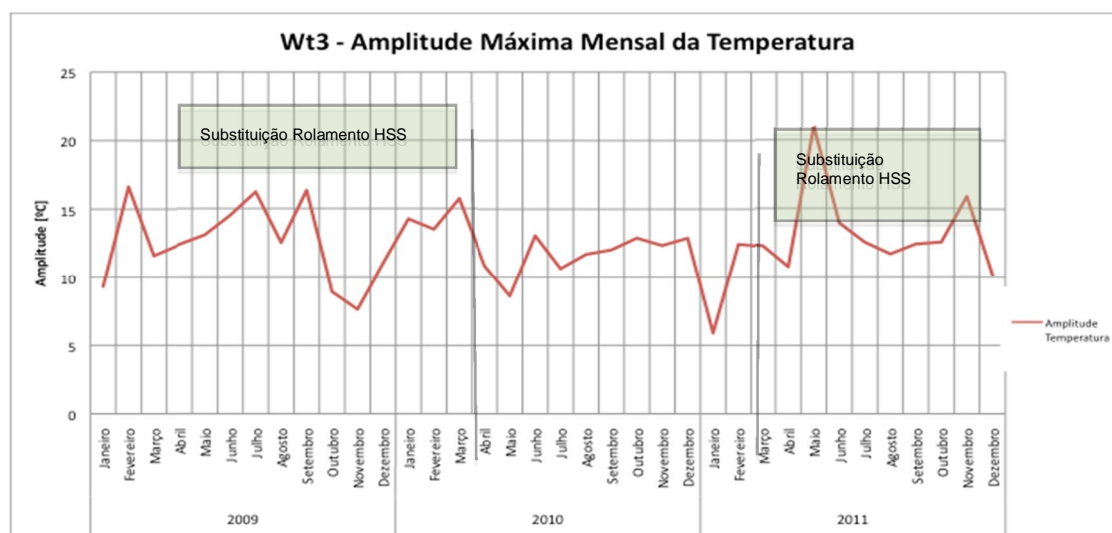


Figura 63 - Gráfico de amplitudes térmicas mensais

Em novembro de 2011, foi realizada uma endoscopia, com a intenção de se conhecer o estado de condição de funcionamento da caixa multiplicadora do aerogerador n.º 3.



Figura 64 - Endoscopia realizada no final do presente estudo – Nov.2011

4.2.3.4 - Paragens forçadas no Aerogerador Nº3

A figura 65 mostra todas as paragens registadas durante os anos de 2009, 2010 e 2011. Nota-se que, após sucessivas paragens, ocorrem fenómenos de fadiga mecânica, que levam à substituição do rolamento do veio de alta velocidade.

É de referir que, na segunda substituição do rolamento, não houve tantas paragens por motivos de ventos superiores a 25 m/s, mas esteve igualmente sujeito a 24 paragens em novembro e 32 em dezembro por motivo de falha na rede.

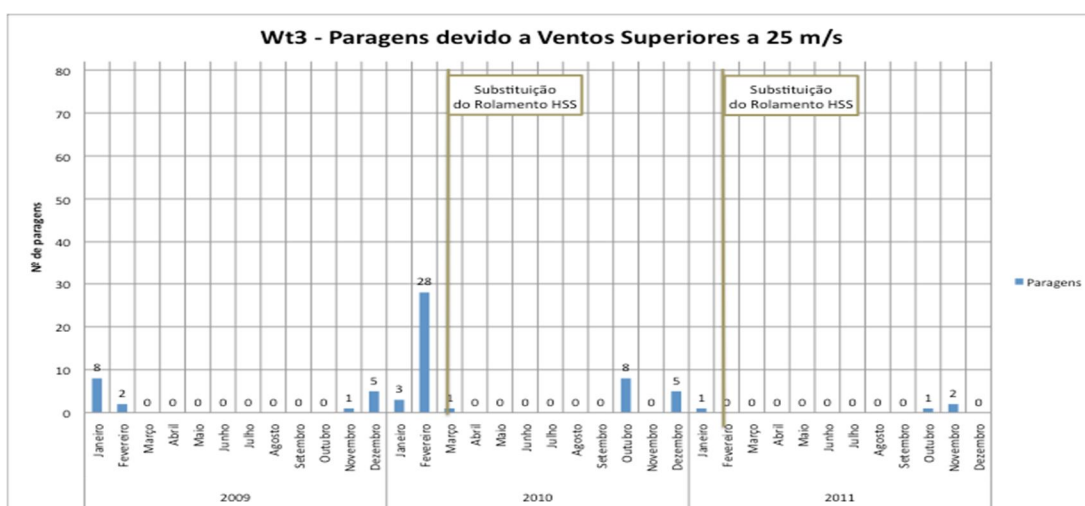


Figura 65 - Gráfico de paragens determinada por ventos superiores a 25 m/s

4.2.3.5 - Conclusões para o Aerogerador Nº3

Analisando os dados recolhidos no decorrer dos três anos, constata-se que um número de paragens superior a 25, sejam por motivos de velocidade de ventos superiores a 25 m/s ou por falhas na rede, influencia as falhas prematuras ocorridas no aerogerador.

Nas análises aos óleos, observámos que um valor elevado do contaminante “cobre” indica problemas nos rolamentos, apesar de o óleo ter sido substituído em Novembro de 2008 e os valores do cobre terem descido, não evitou a substituição do rolamento. Significa que muito provavelmente as partículas de cobre provenientes do rolamento já estariam a contaminar o óleo desde 2007.

4.2.4 - Aerogerador Nº4

Na tabela seguinte, encontramos as intervenções e as avarias registadas no aerogerador n.º 4.

Turbina 4 (NX8204)			
	08/11/17	WindParkService	Substituição do óleo
	09/05/19	Nordex	Instalação CMS
	09/02/16	Nordex	Inspecção Caixa Multiplicadora
	09/12/04	YES	Substituição do óleo
	09/03/27	Nordex	Recolha amostra óleo caixa
	10/03/01	Eichkoff	Substituição Rolamentos HS
	10/10/18	Nordex	Aplicação de solventes
	10/10/25	Nordex	Substituição do óleo
	11/04/08	3G Gearcheck	Inspecção Caixa Multiplicadora
	11/10/21	Iberwind	Recolha amostra óleo caixa
	11/11/04	Iberwind	Inspecção Caixa Multiplicadora
	11/10/27	Nordex	Substituição filtro óleo caixa
	11/10/28	Nordex	Substituição do óleo
	11/11/04	Nordex	Substituição filtro óleo caixa
	12/01/19	Weartech	Substituição do óleo

Tab. 10 - Tabela de registo de intervenções no Aerogerador nº4

No caso do aerogerador n.º 4, verificamos que houve uma substituição do óleo no final de todos os anos entre 2008 e 2011.

Depois de estudados todos os parâmetros relevantes para o normal funcionamento do aerogerador, espera-se que, quando o óleo é substituído, mantenha as suas propriedades lubrificantes nas melhores condições, evitando que a caixa multiplicadora se degrade.

No caso concreto deste aerogerador, foram realizadas sucessivas substituições de óleo e endoscopias, traduzindo-se numa melhoria relativamente à vida útil das caixas multiplicadoras.

Foram registadas vibrações elevadas no rolamento do veio de alta velocidade, tendo-se verificado uma coincidência entre o período de falha deste aerogerador e os aerogeradores n.º 1 e n.º 3.

4.2.4.1 - Vibrações no Aerogerador N°4

Durante o mês de novembro de 2009, surgiram alarmes no CMS (valores globais), indicando valores de vibrações elevados provenientes do sensor (Gb3) do veio de alta velocidade à saída da caixa multiplicadora, os dados cinemáticos utilizados encontram-se na tabela 6, tendo em conta a velocidade de rotação ser semelhante. O espectro (envelope) indica a frequência de defeito na pista interna a 195 Hz que pode ser observado na (fig. 66).

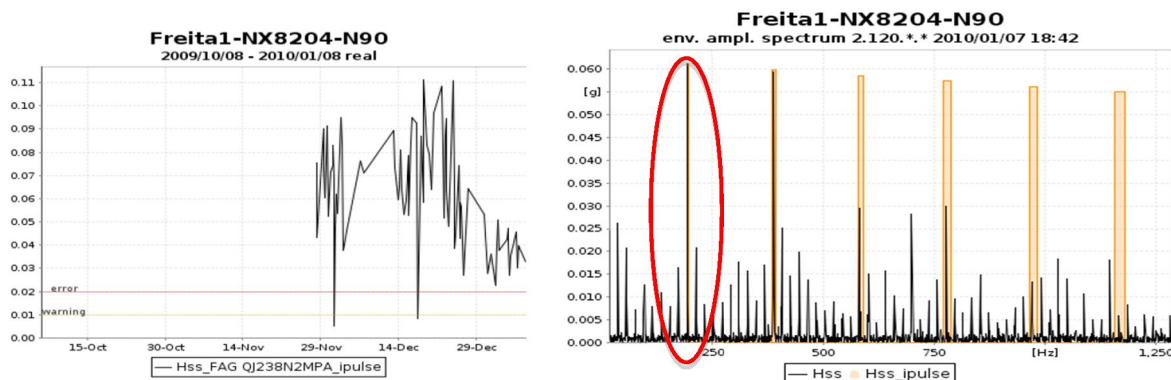


Figura 66 - Espectro de vibrações na caixa multiplicadora nº4 – Gb3

Após o alarme de vibrações seguiu-se a substituição do referido rolamento (fig.67). Após a sua desmontagem, confirmou-se um nível de degradação de terceira fase, já que a superfície da pista interna apresentava um estado de degradação significativa e o arranque de material tinha por efeito arredondar completamente os bordos da fenda (os valores de vibração em aceleração são aproximadamente o dobro dos valores registados nos aerogeradores nº1 e nº3).

Constatou-se também que não existiram recolhas do CMS antes de 20 de novembro, devido a problemas técnicos, permitindo que o rolamento atingisse este estado de degradação.

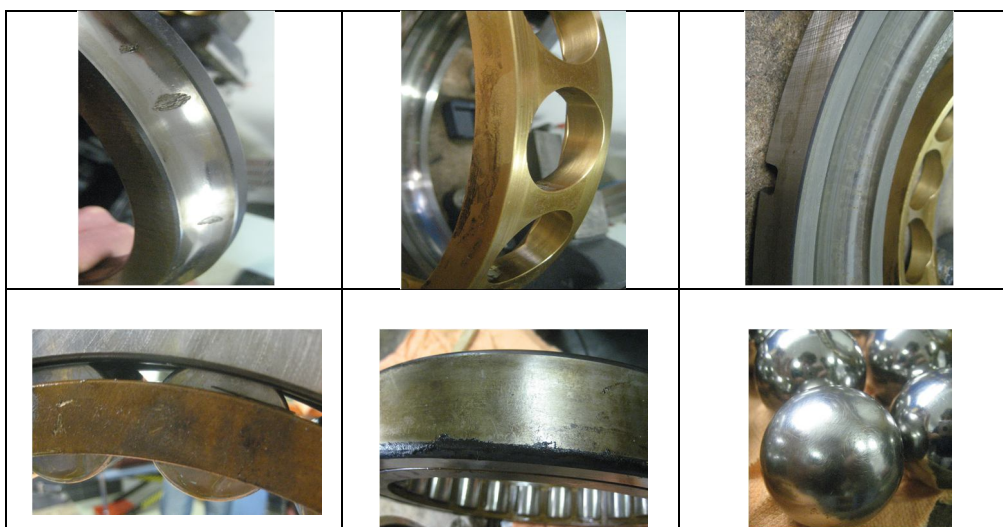


Figura 67 - Substituição do par de rolamentos do veio alta velocidade

4.2.4.2 - Amplitudes térmicas e análise ao óleo no Aerogerador N°4

Conforme procedimento habitual, foram realizadas médias mensais. De acordo com a figura 68, os meses de verão registaram amplitudes que se aproximaram dos 20° C. Apesar de elevadas, não influenciaram a caixa multiplicadora, devido à adoção de uma medida preventiva relativa à substituição do óleo.

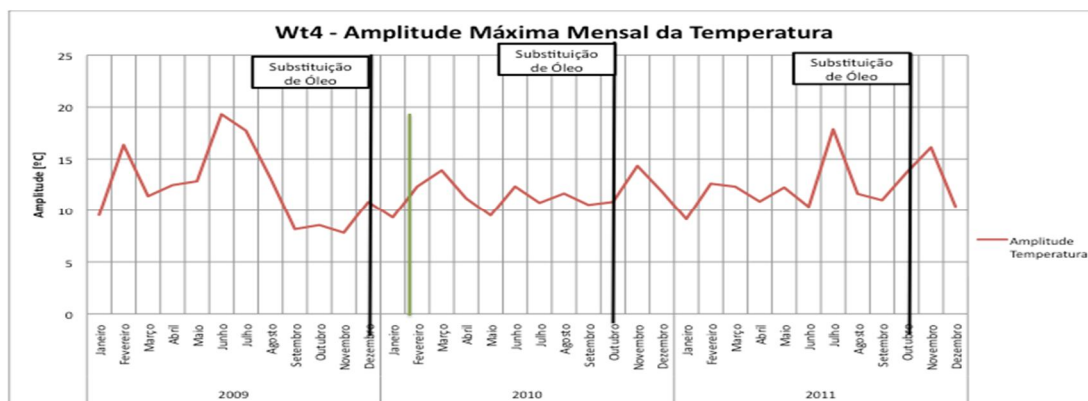


Figura 68 - Gráfico de amplitudes térmicas mensais

Na figura 68, são apresentados os valores indicadores dos contaminantes do óleo concernentes à data imediatamente anterior à substituição do rolamento do veio de alta velocidade. Nela, é possível observar que as percentagens de cobre apresentam valores superiores às do ferro, o que significa a existência de problemas nos rolamentos.

Este aerogerador apresenta um comportamento semelhante ao n.º 3, verificando-se uma relação igual entre a substituição de óleo e a ausência de falhas na caixa.

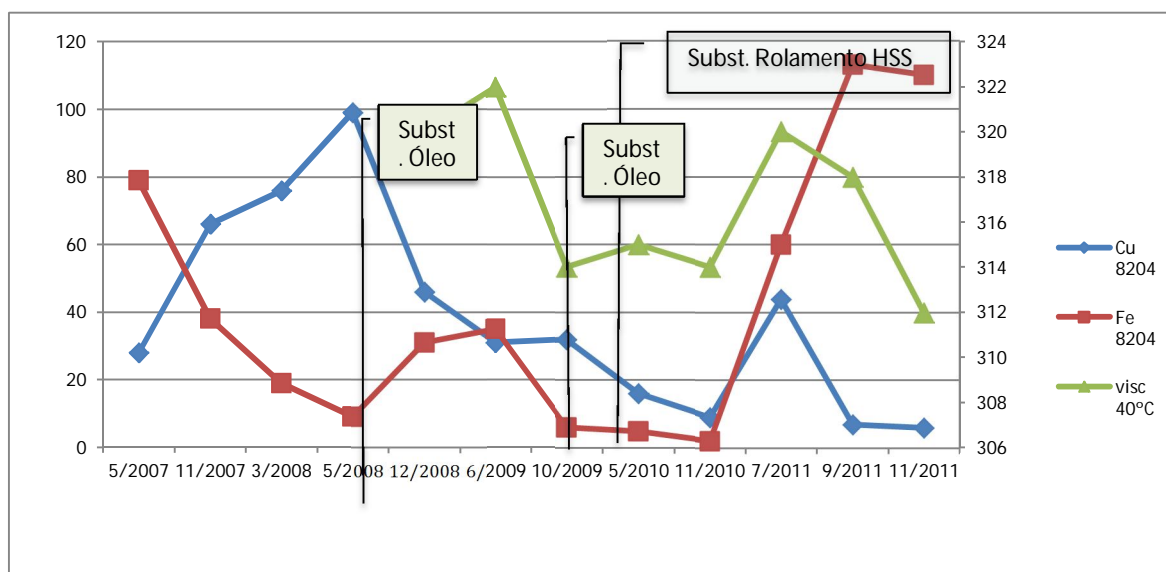


Figura 68 – Gráfico da análise de óleo ao gerador nº4 em ppm

4.2.4.3 - Paragens forçadas no Aerogerador Nº4

À semelhança do sucedido com os aerogeradores anteriormente referidos, foram contabilizadas igualmente todas as paragens de emergência e as paragens ocorridas por motivos de ventos com velocidades superiores a 25 m/s, a fim de se compreender a origem das inúmeras falhas ocorridas no princípio da vida útil do aerogerador.

A figura 69 mostra, assim, todas essas paragens, que foram registadas entre 2009 e 2011.

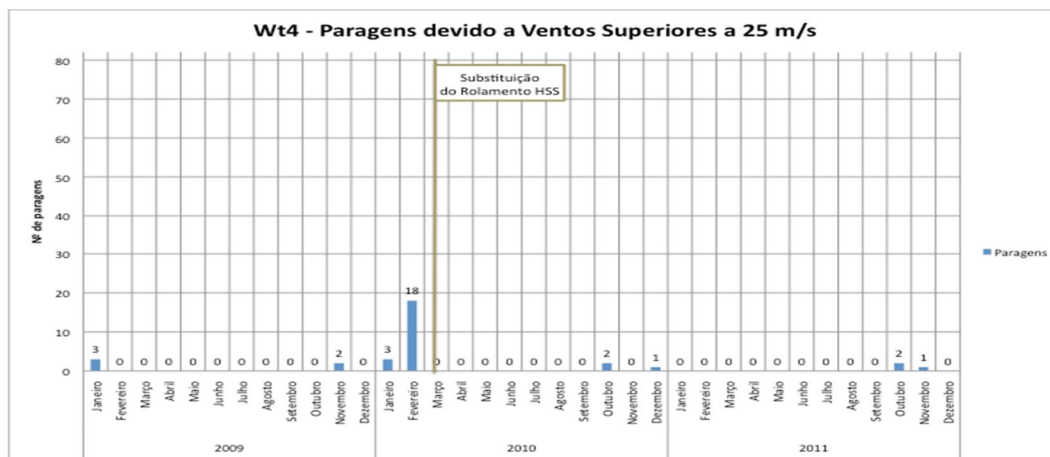


Figura 69 - Gráfico de paragens devido a ventos superiores a 25m/s

4.2.4.4 - Conclusões para o Aerogerador Nº4

Tendo subjacente a figura 69, conclui-se que a falha do rolamento do veio de alta velocidade estará relacionada com as paragens súbitas provocadas por ventos superiores a 25 m/s. No caso particular deste aerogerador, não devemos esquecer a importância do controlo das amplitudes térmicas, pois suspeita-se que estas contribuem de forma significativa para a degradação do lubrificante.

4.2.5 - Aerogerador Nº5

Na tabela seguinte, são mencionadas as intervenções e as avarias registadas no aerogerador n.º 5.

Turbina 5 (NX8213)	Data	Empresa	Tipo Intervenção
	09/01/16	Eichkoff	Inspecção Caixa
	09/02/20	Nordex	Multiplicadora
	09/05/06	Nordex	Substituição Caixa
	11/11/02	Iberwind	Multiplicadora
			Instalação CMS
			Inspecção caixa

Tab. 11 - Tabela de registo de intervenções no aerogerador nº5

A 15 de janeiro de 2009, foram detetados níveis de ruído muito elevados logo na entrada do aerogerador, de modo que, como medida preventiva, optou-se por realizar uma endoscopia no dia seguinte. Esta permitiu verificar que, no 2.º estágio, os dentes se encontravam partidos. No final, procedeu-se à paragem imediata do aerogerador.

Não existem, porém, registos de vibrações, porque, à data do facto, o sistema de monitorização CMS ainda não tinha sido instalado.

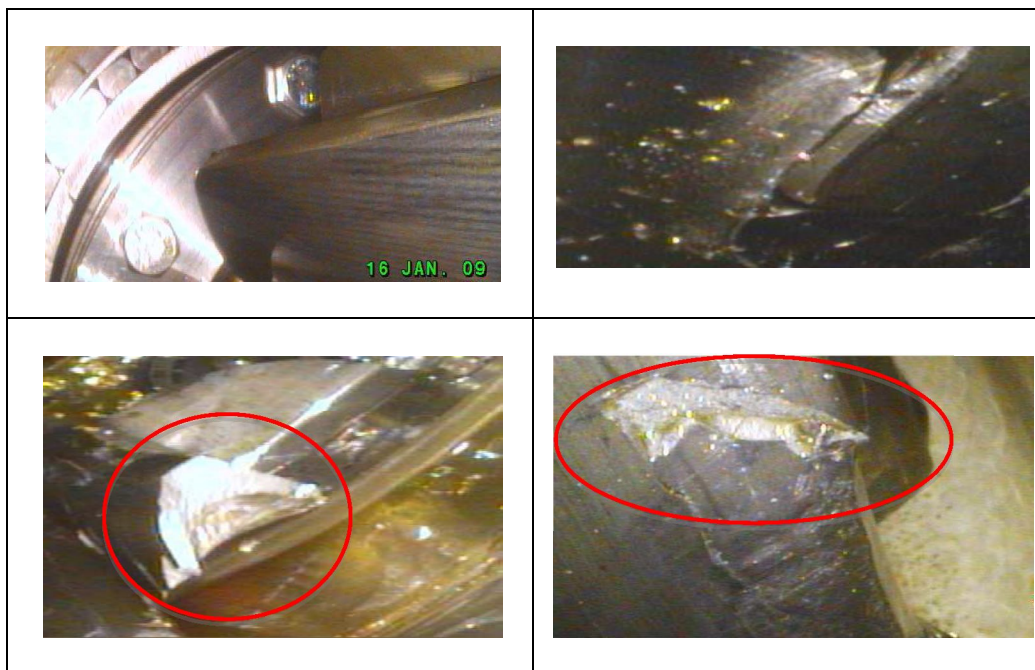


Figura 70 - Endoscopia caixa multiplicadora aerogerador nº5

4.2.5.1 - Análise de óleos no Aerogerador Nº5

Na figura 71, podemos observar os valores indicadores dos contaminantes do óleo referentes à data imediatamente anterior à substituição da caixa multiplicadora.

Assim, a propósito desses valores, gostaríamos de realçar o facto de as percentagens de cobre apresentarem valores superiores às de ferro. Quando existem problemas nos dentes da engrenagem da caixa multiplicadora, os níveis de ferro costumam subir; no entanto, nesta fase, o que se constatou no resultado das análises efetuadas antes da substituição da caixa, foi que existiam dimensões significativas de partículas provenientes do estado avançado de degradação dos dentes (ISO4406 - 27/24/17).

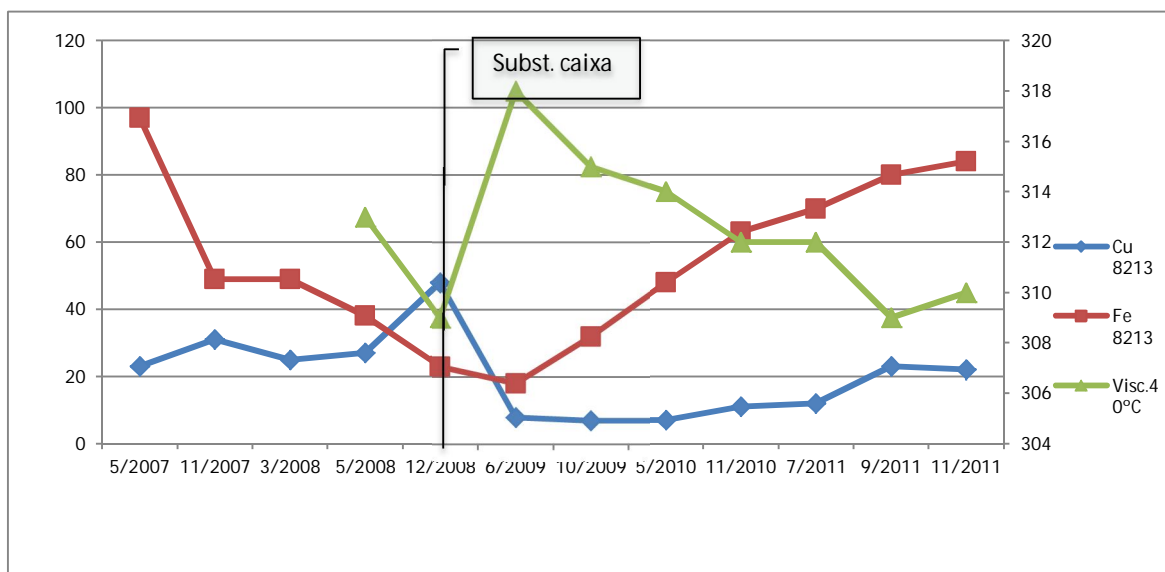


Figura 71 - Gráfico da análise de óleo WT Nº5 em ppm

4.2.5.2 - Amplitudes Térmicas no Aerogerador N°5

Para se compreender os efeitos provocados pelas amplitudes térmicas, foram realizadas médias mensais baseadas num registo diário com intervalo de tempo de 10 minutos.

Através do gráfico é possível observar que durante os meses de Verão as amplitudes térmicas aproximam-se dos 20°C, apesar de elevadas não surtiram os seus efeitos na caixa multiplicadora, devido à substituição de óleo como medida preventiva.

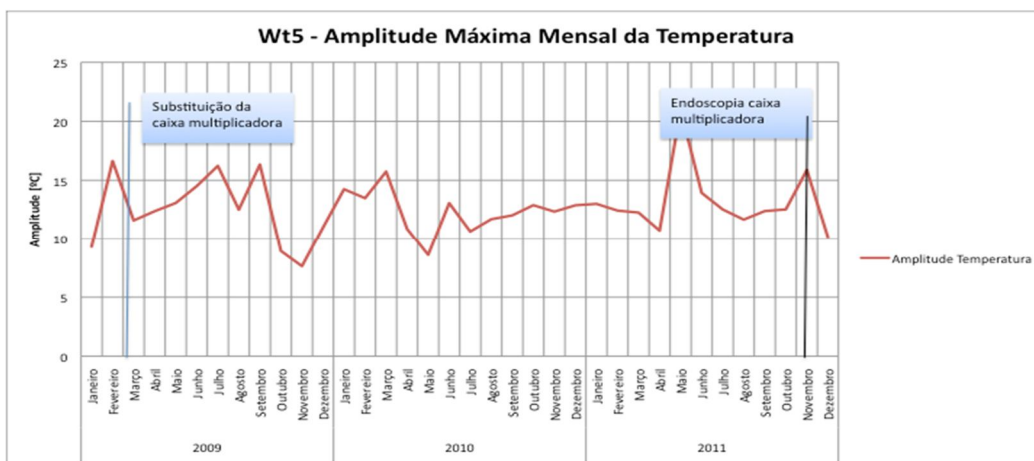


Figura 72 - Gráfico de amplitudes térmicas mensais

4.2.5.3 - Paragens Forçadas no Aerogerador N°5

Na figura 73, podemos observar todas as paragens que foram registadas durante 2009, 2010 e 2011. Consta-se que, depois de paragens sucessivas, ocorrem fenómenos de excesso de carga, que obrigam à substituição da caixa multiplicadora.

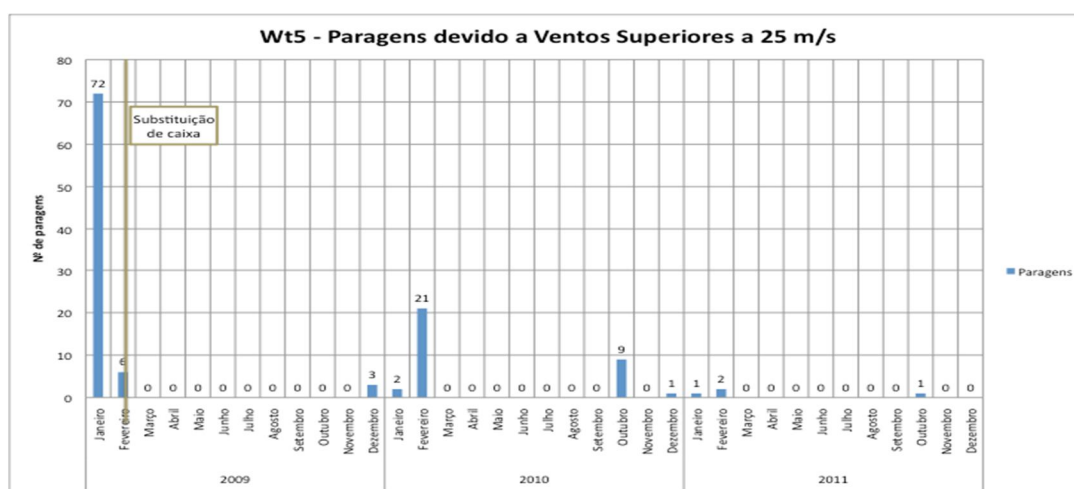


Figura 73 - Gráfico de paragens devido a ventos superiores a 25m/s

4.2.5.4 - Conclusões para o Aerogerador Nº5

A análise da figura 73 leva-nos a concluir que as falhas e as quebras das caixas multiplicadoras estarão relacionadas com as paragens súbitas provocadas por ventos superiores a 25 m/s. No que se refere a este aerogerador, também não devemos esquecer a importância de se controlar as amplitudes térmicas e de se analisar os óleos com periodicidade reduzida (3 meses).

4.2.6 - Aerogerador Nº6

A tabela que se segue mostra as intervenções e as avarias registadas no aerogerador n.º 6.

Turbina 6 (NX8214)			
09/06/02	Nordex	Instalação CMS	
09/02/16	Nordex	Inspecção Caixa Multiplicadora	
10/03/03	Eichkoff	Substituição Rolamentos HHS	
10/03/04	Nordex	Substituição do óleo	
10/10/26	Nordex	Substituição do óleo	
11/04/05	Nordex	Substituição do óleo	
11/04/06	Iberwind	Recolha amostra óleo caixa	
11/11/04	Iberwind	Inspecção Caixa Multiplicadora	
11/05/10	Nordex	Substituição do óleo	

Tab. 12 - Tabela de registo de intervenções no Aerogerador nº6

Analisando a tabela precedente, verificamos que o rolamento do veio de alta velocidade foi substituído no início de 2010 no aerogerador n.º 6, após o alarme proveniente do CMS.

Depois de estudados todos os parâmetros relevantes para o normal funcionamento do aerogerador, conclui-se que, quando o óleo é substituído, consegue manter as suas propriedades lubrificantes nas melhores condições (fig.75), evitando que a caixa multiplicadora se degrade e, por conseguinte, seja substituída.

Foram registadas vibrações elevadas no rolamento do veio de alta velocidade, tendo o período de falha deste aerogerador coincido com os aerogeradores n.º 1, 3 e 4.

4.2.6.1 - Vibrações no Aerogerador N°6

Durante o mês de janeiro de 2010, surgiram alarmes no CMS, indicando valores de vibrações elevados provenientes do sensor (Gb3) do veio de alta velocidade à saída da caixa multiplicadora, os dados cinemáticos utilizados encontram-se na tabela 4, tendo em conta a velocidade de rotação ser semelhante. O espectro indica a frequência de defeito na pista interna a 195 Hz que pode ser observado na (fig. 74).

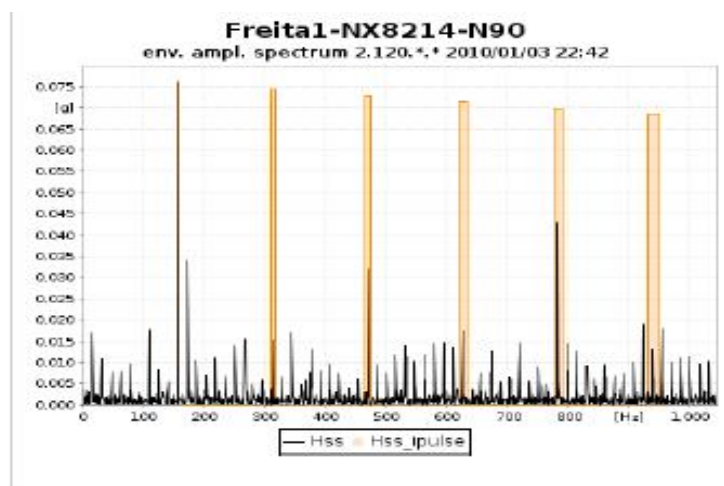


Figura 74 - Espectro de vibrações na caixa multiplicadora WT N°6

Após o alarme de vibrações, procedeu-se à substituição do referido rolamento. Depois de ter sido desmontado, confirmou-se um nível de degradação de terceira fase. Na verdade, a superfície da pista apresentava um estado de degradação significativa e o arranque de material tinha por efeito arredondar completamente os bordos da fenda. Um dos motivos apontados para semelhante situação será uma lubrificação deficiente, mas também pode estar na origem da falha do rolamento as 21 paragens no mês antes da sua substituição.

4.2.6.2 - Análise de óleos no Aerogerador N°6

Na figura seguinte (75), encontram-se os valores dos contaminantes do óleo alusivos à data imediatamente anterior à substituição do rolamento do veio de alta velocidade. Nela, observamos que as percentagens de cobre apresentam valores superiores às de ferro no período que antecedeu a substituição do rolamento do veio de alta velocidade.

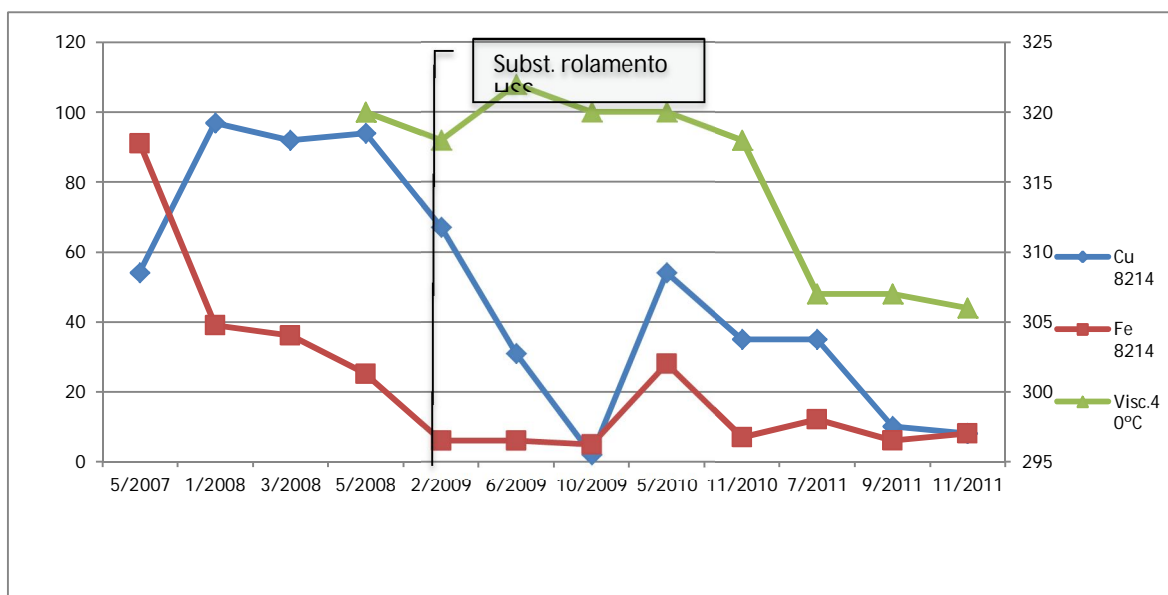


Figura 75 - Gráfico análise de óleos aerogerador nº6 em ppm

4.2.6.3 - Amplitudes térmicas no Aerogerador Nº6

Através do gráfico seguinte (fig. 76), verificamos que, durante os meses de verão, as amplitudes térmicas se aproximaram dos 20°C. Mesmo elevadas, não tiveram efeitos na caixa multiplicadora, devido à substituição de óleo como medida preventiva.

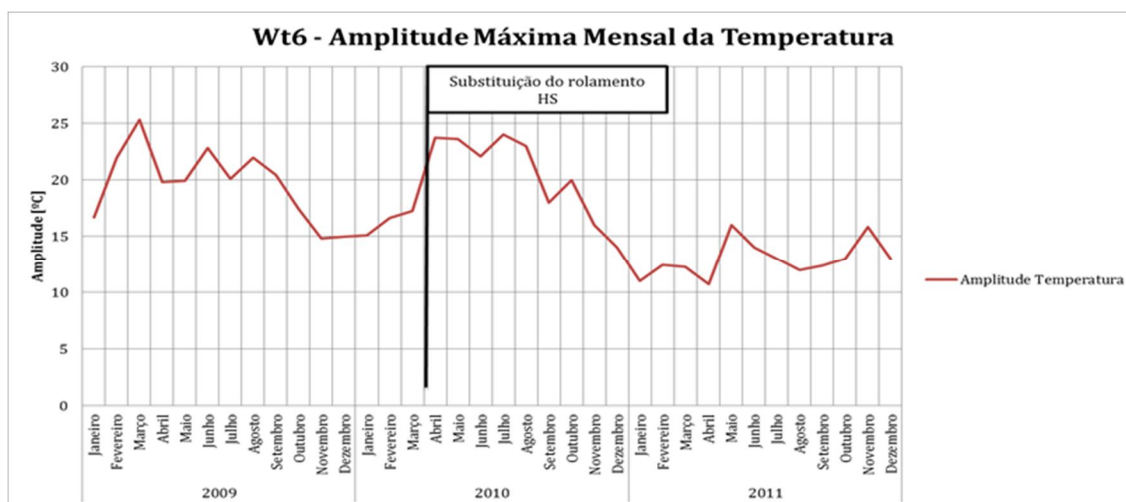


Figura 76 - Gráfico de amplitudes térmicas mensais

4.2.6.4 - Paragens forçadas no Aerogerador N°6

Conforme procedimento habitual em matéria de paragens forçadas, contabilizámos todas as paragens ocorridas por motivos de ventos com velocidades superiores a 25 m/s para compreendermos a origem da falha ocorrida no rolamento do veio de alta velocidade.

Na figura 77, podemos observar todas as paragens registadas entre 2009 e 2011, as quais originam grandes esforços no interior da caixa, assim como no rolamento do veio de alta velocidade.

Constatamos que, após sucessivas paragens, ocorrem fenómenos de fadiga mecânica, obrigando à substituição do rolamento do veio de saída da caixa multiplicadora.

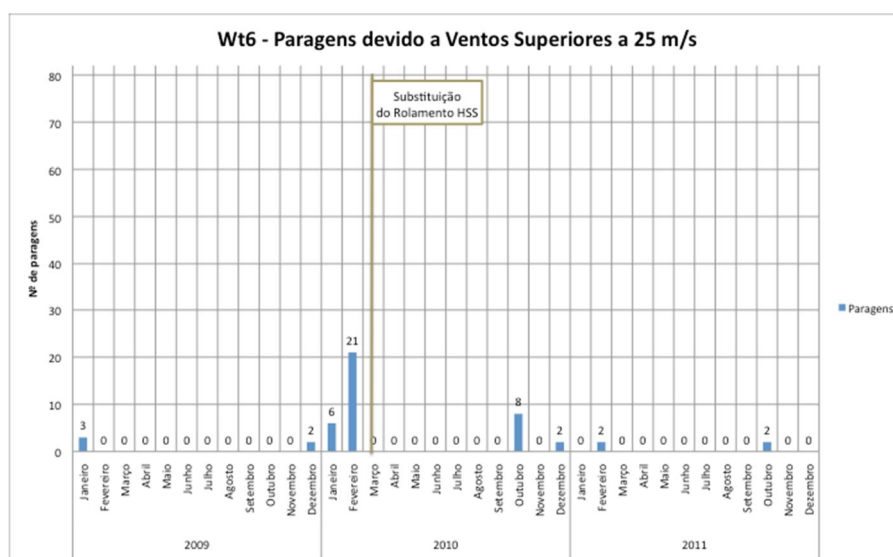


Figura 77 - Gráfico de paragens devido a ventos superiores a 25m/s

4.2.6.5 - Conclusões para o Aerogerador N°6

Verificámos que o número elevado de paragens devidas a ventos superiores a 25 m/s estará diretamente relacionado com a substituição do rolamento do veio de alta velocidade, pois também é aquele que está mais próximo do travão.

4.2.7 - Aerogerador N°7

As intervenções e as avarias registadas no aerogerador n.º 7 estão identificadas na tabela que se segue.

Turbina 7 (NX8215)		
08/04/01	Nordex	Recolha amostra óleo caixa
09/06/17	Nordex	Instalação CMS
09/02/18	Nordex	Inspecção Caixa Multiplicadora
10/03/04	Eichkoff	Substituição Rolamentos HHS
10/03/12	Nordex	Substituição do óleo
11/02/21	Eichkoff	Inspecção Caixa Multiplicadora
11/05/09	Nordex	Teste CMS
11/10/21	Iberwind	Recolha amostra óleo caixa
11/11/04	Iberwind	Inspecção Caixa Multiplicadora
12/01/19	Weartech	Substituição do óleo

Tab. 13 Tabela de registo de intervenções no Aerogerador n°7

Segundo a tabela acima apresentada, houve uma substituição do rolamento do veio de alta velocidade no início de 2010 no aerogerador n.º 7, após o alarme proveniente do CMS.

Estudados todos os parâmetros relevantes para o normal funcionamento do aerogerador, conclui-se que, quando o óleo é substituído, conserva as suas propriedades lubrificantes nas melhores condições, evitando que a caixa multiplicadora se degrade e seja substituída.

Foram registadas vibrações elevadas no rolamento do veio de alta velocidade e, também neste aerogerador, o período de falha coincidiu com os aerogeradores n.º 1, 3, 4 e 6.

4.2.7.1 - Vibrações no Aerogerador N°7

Conforme procedimento habitual em matéria de análise de vibrações, após o alarme em janeiro de 2010 com valores globais relativamente elevados, calcularam-se as frequências de defeito que indicavam problemas na pista externa do veio de alta velocidade à saída da caixa multiplicadora, sensor Gb3. De seguida procedeu-se à endoscopia, logo seguida da substituição do referido rolamento, que, após desmontagem confirmou-se um nível de degradação da terceira fase, a superfície da pista apresenta um estado de degradação significativa e o arranque de material tem por efeito arredondar completamente os bordos da fenda, um dos motivos apontados será lubrificação deficiente.

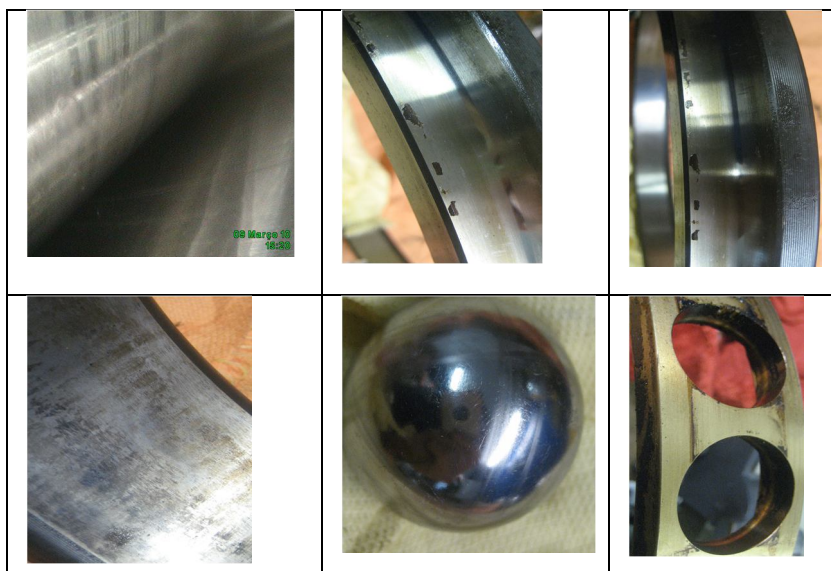


Figura 78 - Endoscopia seguida de substituição do rolamento veio alta velocidade

4.2.7.2 - Análise de óleos no Aerogerador N°7

Na figura 79, encontram-se os valores dos contaminantes do óleo relativos à data imediatamente anterior à substituição do rolamento do veio de alta velocidade. Observamos que as percentagens de cobre apresentaram valores elevados no período que antecedeu a substituição do rolamento.

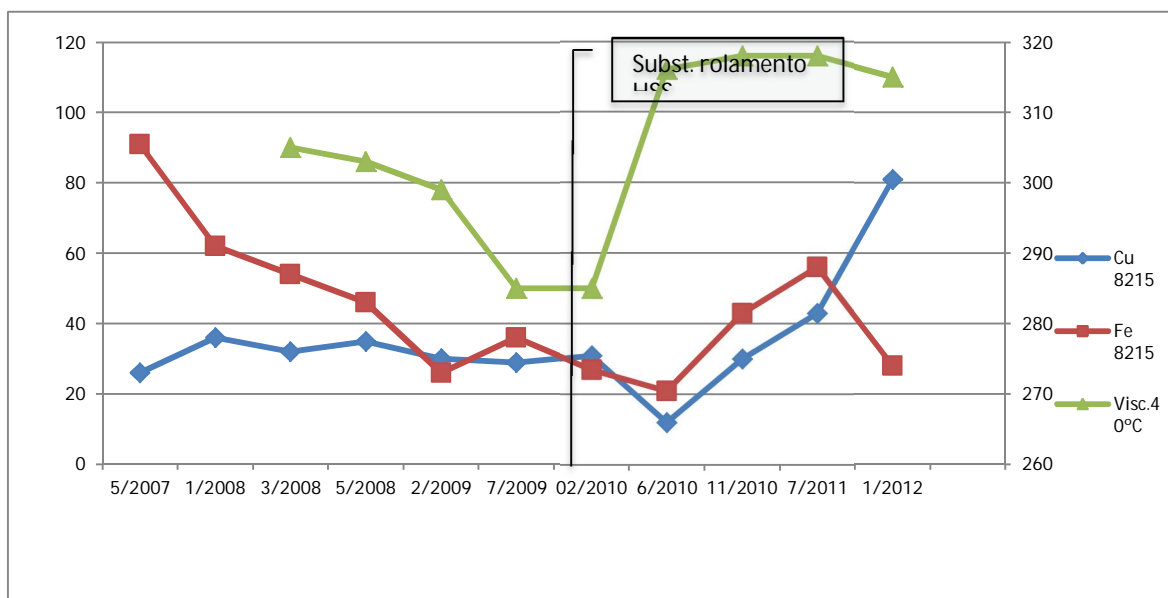


Figura 79 - Gráfico análise de óleos aerogerador n°7 em ppm

4.2.7.3 - Amplitudes térmicas no Aerogerador N°7

A figura 80 apresenta-nos um gráfico que dá conta das amplitudes térmicas atingidas ao longo de três anos – de 2009 a 2011. Nos meses de verão, verificamos que se aproximaram dos 20º C, mas, apesar de elevadas, não surtiram efeitos na caixa multiplicadora, em virtude de se ter substituído o óleo a título de medida preventiva.

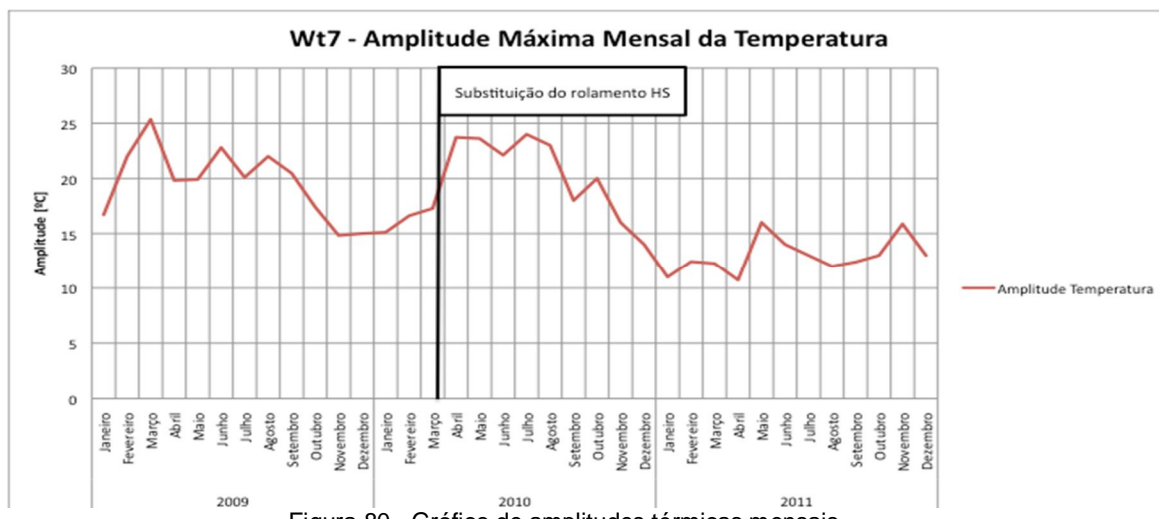


Figura 80 - Gráfico de amplitudes térmicas mensais

4.2.7.4 - Paragens Forçadas no Aerogerador N°7

Uma vez mais e, conforme pode ser observado na figura 81, foram contabilizadas todas as paragens de emergência e aquelas ocorridas por motivos de ventos com velocidades superiores a 25 m/s. Constata-se que, após sucessivas paragens, ocorrem fenómenos de fadiga mecânica, que determinam a substituição do rolamento do veio de saída da caixa multiplicadora.

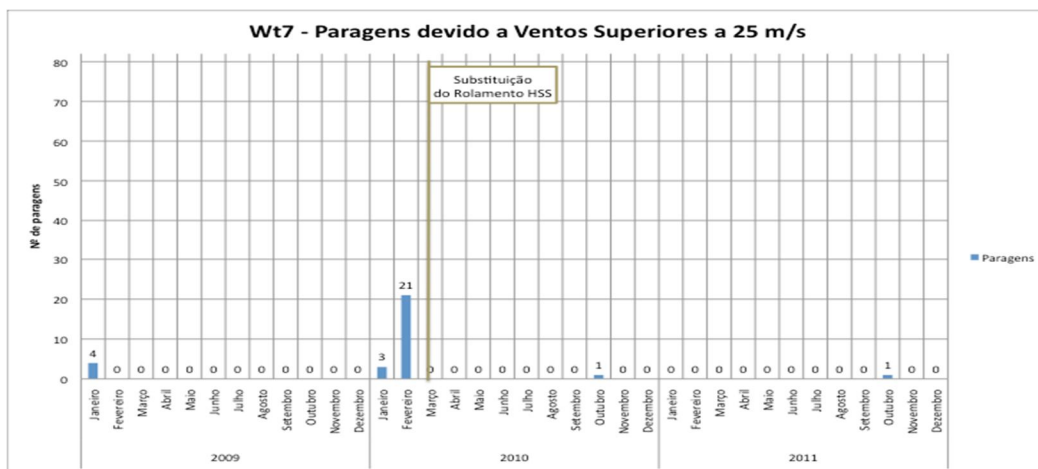


Figura 81 - Gráfico de paragens devido a ventos superiores a 25m/s

4.2.7.5 - Conclusões para o Aerogerador Nº7

Verificámos que o número elevado de paragens causadas por ventos superiores a 25 m/s indica que existe uma forte relação com a substituição do rolamento do veio de alta velocidade, na medida em que também é aquele que está mais próximo do travão.

Podemos observar que, sempre que o óleo é substituído, o tempo de vida da caixa multiplicadora aumenta.

4.2.8 - Aerogerador Nº8

Na tabela seguinte, são mencionadas intervenções registadas no aerogerador nº8.

Turbina 8 (NX8216)	01-04-2008	Nordex	Recolha amostra óleo caixa
	18-06-2009	Nordex	Instalação CMS
	19-02-2009	Nordex	Inspecção Caixa Multiplicadora
	27-03-2010	Nordex	Substituição do óleo
	13-05-2011	Nordex	Problemas CMS

Tab. 14 Tabela de registo de intervenções no Aerogerador nº8

Com vista a proteger os componentes mecânicos, no início de 2010, procedeu-se à substituição do óleo. Esta medida foi tomada após a ocorrência de 21 paragens. Atuou-se desta forma, com o intuito de se testar se este procedimento, quando realizado atempadamente, pode prevenir falhas precoces. Deve ser realçado que esta substituição só foi possível devido a já se encontrarem criadas as condições logísticas necessárias para o efeito no parque eólico em estudo.

A medida preventiva de substituição do óleo prendeu-se com a existência de algumas desconfianças nos resultados das amostras de óleo, pois por diversos momentos estes não apresentaram coerência. Nos aerogeradores anteriores, suspeitava-se que esse fosse um dos motivos que provocava a existência de falhas precoces. A verdade é que este aerogerador foi o único que não apresentou falhas, depois desta alteração de procedimentos de manutenção.

4.2.8.1 - Análise de óleos no Aerogerador N°8

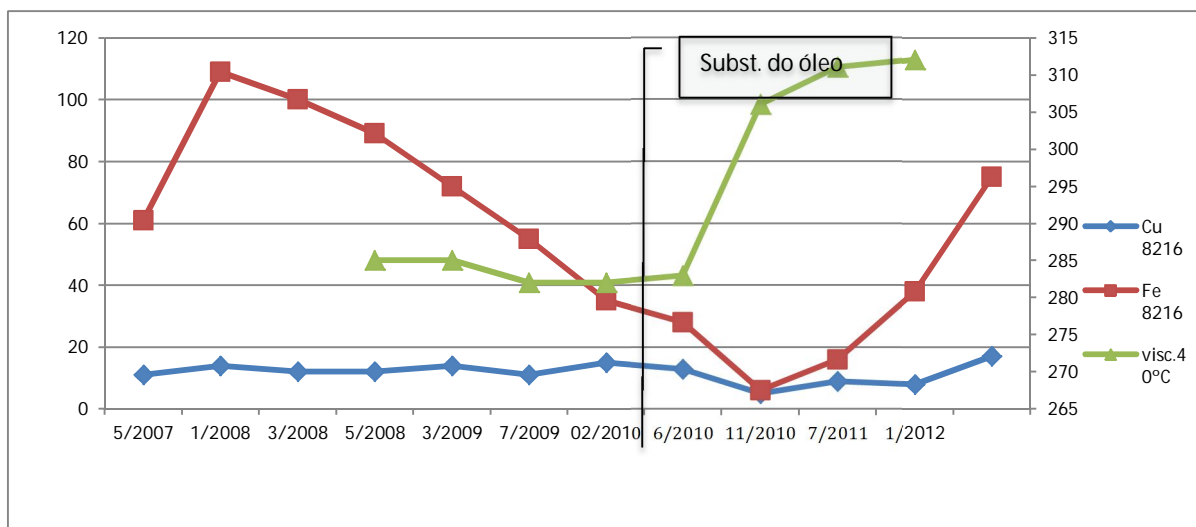


Figura 82 - Gráfico análise de óleos aerogerador nº8 em ppm

É possível observar que a viscosidade do óleo apresenta valores muito baixos no período precedente à substituição do óleo, contudo, através das reposições efetuadas desde 2008, conseguiu-se controlar os níveis de ferro para valores aceitáveis. Deve ser realçado que a informação relativa às reposições de óleo apenas se apresentaram disponíveis neste aerogerador.

4.2.8.2 - Paragens forçadas no Aerogerador N°8

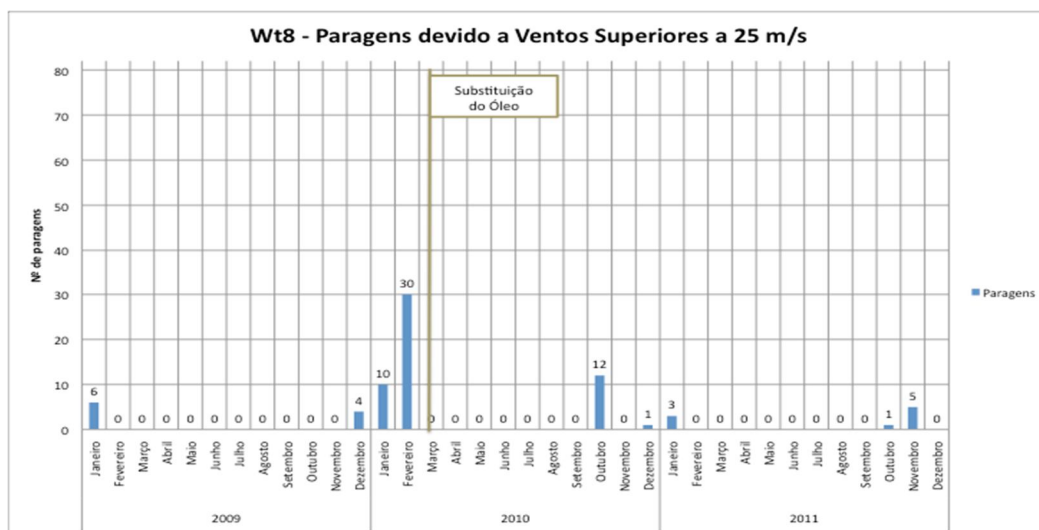


Figura 83 - Gráfico de paragens devido a ventos superiores a 25m/s

A figura 83 mostra as paragens provocadas por ventos fortes, as quais foram registadas durante os anos de 2009, 2010 e 2011. É de notar que estas paragens originam grandes esforços no interior da caixa e no rolamento do veio de alta velocidade. Com a substituição do óleo, após as sucessivas paragens ocorridas, foi possível prevenir algumas das falhas registadas nos outros aerogeradores.

4.2.9 - Análise de resultados do parque da Freita

Verifica-se que o ano de 2010 foi aquele em que houve um maior número de substituições de rolamentos localizados à saída da caixa multiplicadora e no veio de alta velocidade. Constata-se que, nos aerogeradores n.º 2 e n.º 5, não se procedeu à substituição dos rolamentos. No caso do n.º 8, foram alterados os procedimentos de manutenção relativamente às substituições de óleo, a fim de se conseguir implementar um novo modelo de manutenção em aerogeradores.

No início de 2010, foram registadas vibrações excessivas nas caixas multiplicadoras, sempre no veio de alta velocidade à saída da caixa multiplicadora (HSS – rolamento QJ238).

Os valores de vibração mais elevados registaram-se, em janeiro e em fevereiro, no aerogerador n.º 6. O aerogerador que registou valores mais baixos de vibração foi o n.º 1, contudo foi a que mais produziu em 2009.

O aerogerador n.º 2 foi dos que menos produziu em 2009, mas, em 2010, foi o maior produtor de energia no parque eólico da Freita. No final de 2011, foi substituída a sua caixa de engrenagens.

O aerogerador n.º 7 também viu os seus rolamentos do veio de alta velocidade serem substituídos em março de 2010.

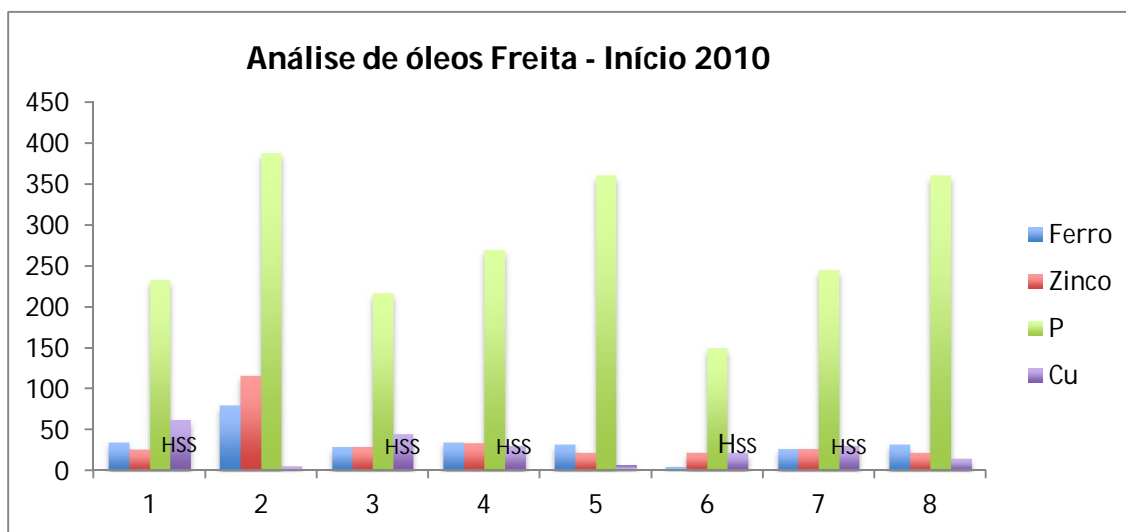


Figura 84 - Gráfico de comparação dos valores dos contaminantes no óleo

A caixa do aerogerador n.º 2 foi substituída a 13 de outubro de 2011, mas apresentou os níveis de cobre mais baixos, mostrando que os rolamentos não foram afetados.

Os valores de cobre apresentados na figura 84 correspondem às recolhas efetuadas durante o mês de fevereiro de 2010. Verifica-se que os níveis deste elemento aumentam quando surgem danos nos rolamentos da caixa de engrenagens.

4.2.9.1 - Conclusões e sugestões do parque eólico da Freitas

Após uma reflexão cuidada a propósito dos dados recolhidos, podemos concluir que, quando os níveis de ferro aumentam para fora dos limites estabelecidos pelos fabricantes das caixas multiplicadoras, são indício do aparecimento de problemas nas engrenagens [34].

Quando existiram substituições de óleo precoces, isto é antes dos dois anos estabelecidos pelo fabricante, a caixa multiplicadora não atingiu níveis de degradação elevados, tendo surgido apenas sinais normais de desgaste. Estas substituições surgiram por diversos motivos, desde dos parâmetros físico-químicos do óleo até a questões logísticas que envolvem o transporte do mesmo.

Constatou-se que os longos períodos que mediam a recolha da amostra do óleo e a entrega dos resultados permitiram a degradação precoce da caixa multiplicadora do aerogerador n.º 2, apresentando valores de $Fe=111$ ppm.

No aerogerador nº8, foram aplicados procedimentos de manutenção diferentes, confirmando a necessidade de se alterar o modelo implementado de gestão da manutenção; algumas das alterações passam pela substituição atempada do óleo, monitorização de amplitudes térmicas e paragens.

As substituições de componentes mecânicos do aerogerador por indicação de alarme devem ficar documentadas através de fotografias e dos respetivos relatórios (sejam eles de vibrações ou de óleos).

Antes de se avançar com a substituição de um rolamento, deve verificar-se o estado dos restantes rolamentos, aproveitando se necessário na mesma intervenção promover também a sua substituição.

Consultaram-se históricos de outros parques eólicos com o intuito de se compreender a influência das paragens e a consecutiva substituição de rolamentos do veio de alta velocidade ou até mesmo da caixa multiplicadora. Para o efeito foram selecionados os aerogeradores que nos últimos 3 anos apresentaram problemas no rolamento do veio de alta velocidade (12 aerogeradores), depois contabilizaram-se o número de paragens dos mesmos e a conclusão que se retirou é que existe sempre um número superior a 25.

Durante o período da realização da presente tese não foi possível obter as datas de reposição do nível do óleo, contudo este aspeto não deve ser negligenciado.

Quanto aos valores de vibração apresentados pelos aerogeradores do parque eólico da Freitas, é de realçar os sucessivos registos de valores elevados nos rolamentos do veio de alta velocidade, esta informação ficará documentada e sugere-se que os valores de alarme devem ficar nos 0,06 g, evitando assim os alarmes provenientes de desgaste ainda num estado de degradação muito inicial.

Devem ser criados modelos de gestão da manutenção, tendo como base valores de vibração, utilizando estes valores para produzir gráficos de alerta para cada aerogerador.

Os procedimentos de manutenção nestes aerogeradores, baseados na análise de vibrações, registaram falsos alarmes e substituições precoces, urge então a necessidade de se compreender todos os fatores externos que influenciam negativamente os resultados do cms, para tal será de extrema importância a utilização de ferramentas paralelas, tais como, a análise ao óleo, endoscopia, registo de velocidades do vento e amplitudes térmicas, sempre com o objetivo de minimizar os custos de manutenção.

Constatou-se que a ferramenta análise de vibrações *cms* não está devidamente aproveitada, pois ainda existem valores de alarme para ajustar, este trabalho de investigação deve ser continuado com o objetivo de nos próximos cinco anos prever com alguma exatidão o momento da falha. Se for reunida a informação necessária para a construção do gráfico de tendência, poder-se-á planejar a manutenção de uma forma mais eficiente e também utilizar outras ferramentas indicadoras da fiabilidade e disponibilidade.

Devem ser providenciadas medidas excepcionais de troca de óleos sempre que:

- sejam registadas amplitudes térmicas muito elevadas. Estas devem dar origem a um alarme para que possa ser providenciada uma recolha extra de amostra de óleo, a fim de se conhecer se o mesmo ainda contém as propriedades do lubrificante;
- sejam registadas paragens de emergência por velocidades superiores a 25 m/s. Estas devem dar, igualmente, origem a um alarme para ser providenciada a referida recolha de amostra do óleo;
- não existam alarmes. Nestas circunstâncias, a recolha de amostras de óleo para análise têm que respeitar, criteriosamente, um conjunto de procedimentos e datas de resposta com prazos muito limitados;
- ocorra a receção de um relatório com indicação para substituição do óleo. Nestes casos, deve ser realizada uma contra-análise e, se o resultado se verificar, então, deve promover-se a substituição do óleo;

4.3 - Caso de Estudo do Parque Eólico da Lousã

Foi selecionado o parque eólico da Lousã por existirem vinte aerogeradores que apresentam uma elevada taxa de falhas com maior incidência nos rolamentos do gerador e do veio de alta velocidade. Com o intuito de se compreender a origem do número elevado de falhas, foi realizado, por um lado, um levantamento das avarias, dos tempos de paragem, da produção, das substituições precoces de óleo e dos diferenciais térmicos e, por outro, procedeu-se ao registo dos ventos.

Este parque opera desde 2009 e os seus vinte aerogeradores são da marca/modelo Nordex N90-R80 (2.5 MW). Mede 80 m de altura de torre e apresenta um diâmetro do rotor de 90 m. A *nacelle* pesa 97 ton, o rotor pesa 52 ton e a torre pesa 179 ton.

A caixa multiplicadora tem uma relação de 1:77.44; uma velocidade de entrada de 16 RPM e uma velocidade de saída de 1160 RPM. Pesa 18 500 kg. Foi produzida pelo fabricante Eickhoff e utiliza o lubrificante MobilGear SHC XMP 320.

De forma sucinta, abordaremos os resultados das análises realizadas apenas aos rolamentos danificados, este caso de estudo será abordado de forma diferente da Freita por motivos de suspeição do fenómeno de desalinhamento no acoplamento do veio de saída da caixa e entrada no gerador.

Para ser possível a interpretação de resultados num espetro de frequências, é necessário recorrer a cálculos de forma a ser possível identificar as frequências de defeitos em rolamentos, para tal utilizaram-se os dados do fabricante (fig.85).

Dados cinemáticos (rolamentos do veio de alta velocidade entrada no gerador)			2X	3X	4X
BPFI	Pista Interna (1157,8 rpm)	72,2 Hz	144 Hz	216Hz	361Hz
BPFO	Pista Externa (1157,8 rpm)	61,6 Hz	123 Hz	185Hz	246Hz
BSF	Esfera (1157,8 rpm)	28 Hz	56 Hz	84 Hz	112Hz
FTF	Gaiola (1157,8 rpm)	8,9 Hz	18Hz	27Hz	36Hz
BPFI	Pista Interna (958,8 rpm)	59,9 Hz	119,8	179,7	239,6
BPFO	Pista Externa (958,8 rpm)	51,1 Hz	102,2	153Hz	204,4
BSF	Esfera (958,8 rpm)	23 Hz	46 Hz	69Hz	115Hz

Tab. 15 – Cálculo das frequências de defeitos dos rolamentos na entrada do gerador

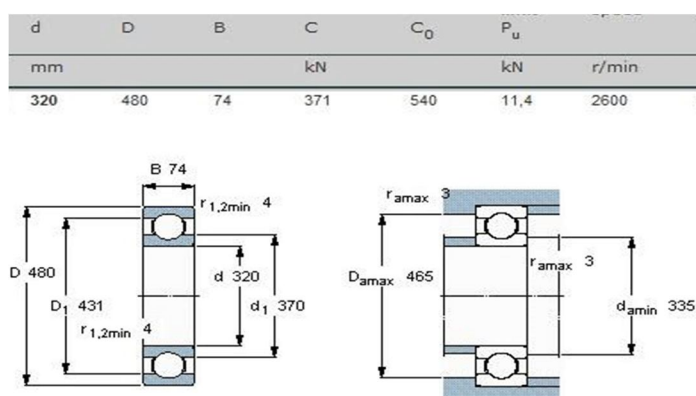


Figura 85 – Características do rolamento 6344M veio de alta velocidade – entrada do gerador

4.3.1 - Aerogerador Nº80921

No espectro da figura 86 é possível observar uma amplitude elevada à frequência da pista interna do rolamento 6344M/C3, 72,2 Hz, calculada com a velocidade de rotação 1157,8 rpm.

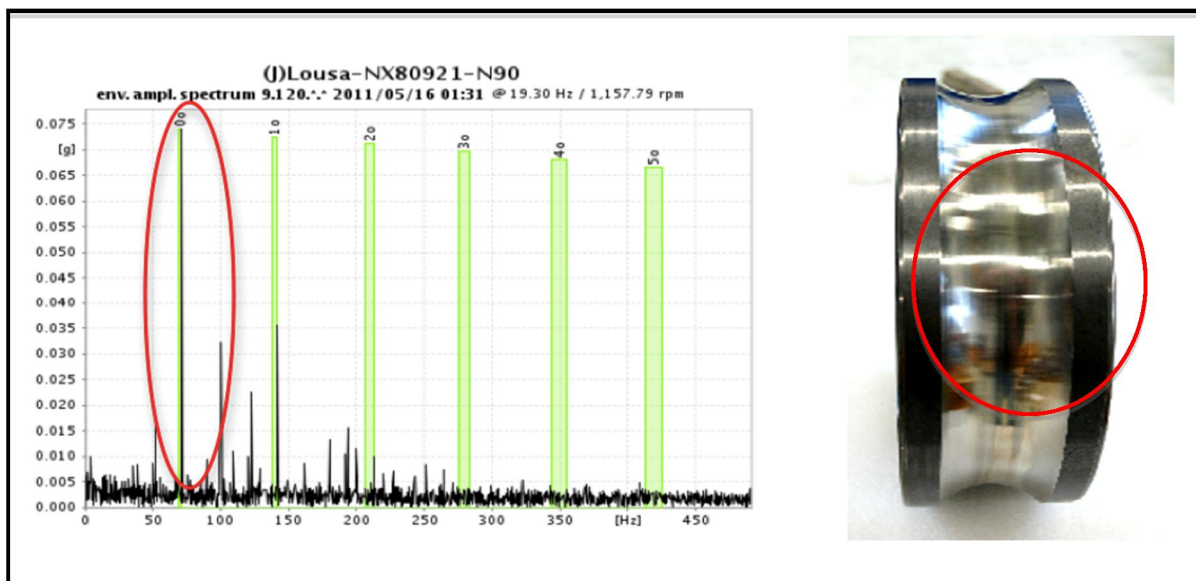


Figura 86 – Espectro de vibrações do rolamento 6344M/C3, danificado na pista interna - gerado

4.3.2 - Aerogerador Nº80926

No espectro da figura 87 é possível observar uma amplitude elevada à frequência de defeito da pista interna (59,9Hz), mas agora com velocidade de rotação de 958,8 rpm.

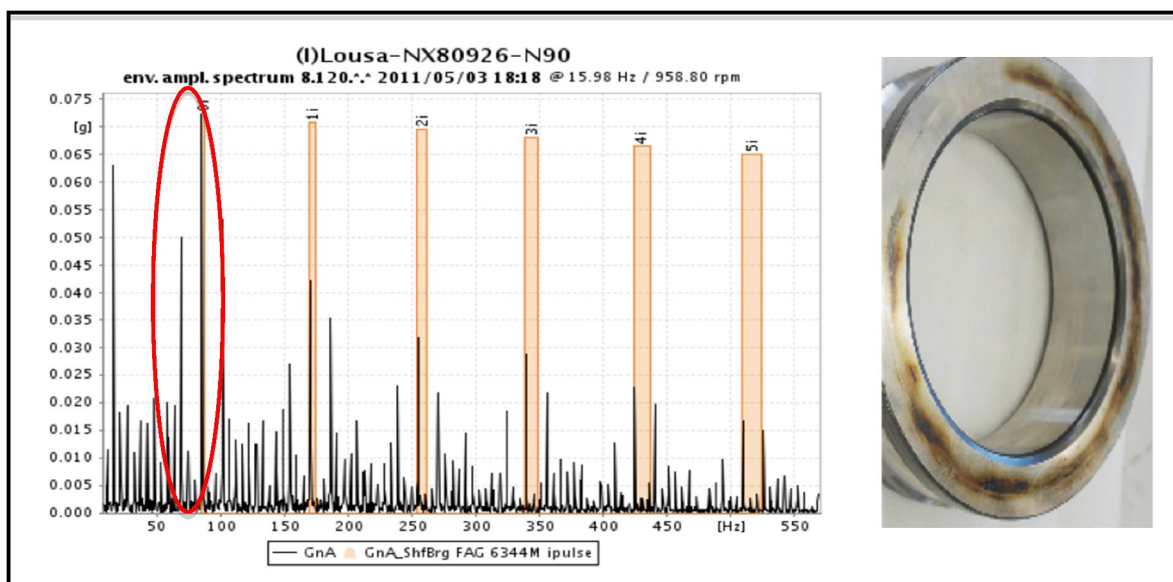


Figura 87 – Espectro de vibrações do rolamento 6344M/C3, danificado na pista interna - gerador

4.3.3 - Aerogerador Nº80930

No espectro da figura 88 é possível observar uma amplitude elevada e suas harmônicas à frequência (69,9 Hz) de defeito da pista interna do rolamento 6344M/C3, calculada com base na velocidade de rotação do veio de alta velocidade à entrada do gerador (1122,8 rpm), na zona do acoplamento.

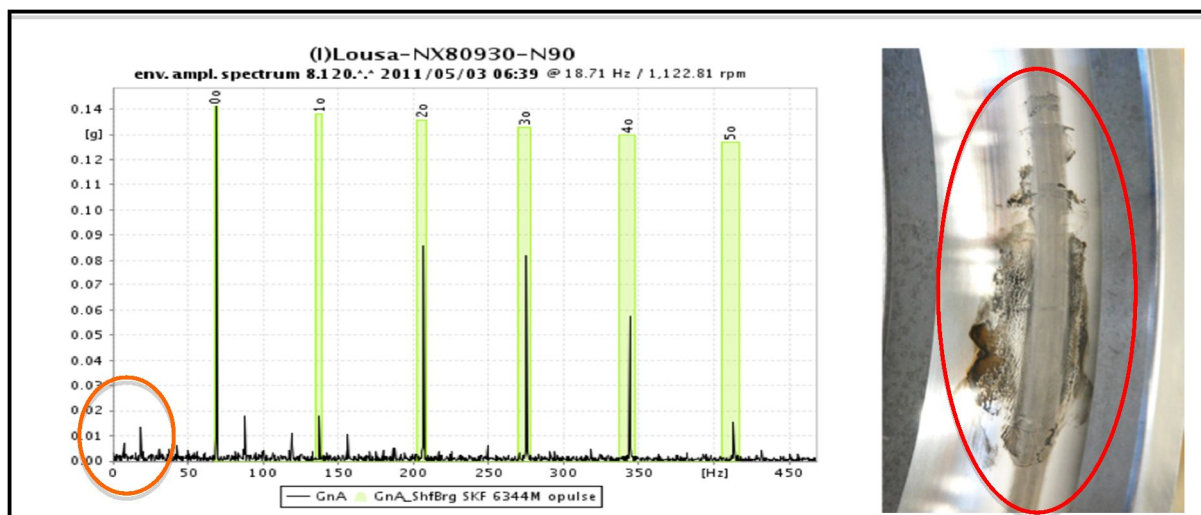


Figura 88 – Espectro de vibrações do rolamento 6344M/C3, danificado na pista interna - gerador

4.3.4 - Comparação do Desgaste da Pista Interna

A figura 89 apresenta as três superfícies da pista de trabalho sujeitas ao desgaste provocadas pelo suposto desalinhamento entre veios de alta velocidade e do gerador, comprovado através do espectro de frequências que mostra a 2xrpm (37,42Hz), marcado com cor laranja, na (fig.88). As amplitudes parecem reduzidas neste espectro, visto este ser para realçar as altas frequências.



Figura 89 - Gráfico de comparação do desgaste da pista interna

As diferenças entre as superfícies são muito nítidas, nomeadamente no que diz respeito ao desgaste do anel interno do rolamento. No caso do aerogerador n.º 80921, este apresenta uma assinatura de desgaste superficial normal em toda a extensão dos 360º do perímetro circunferencial do anel.

Em relação aos rolamentos do aerogerador n.º 80926 e do n.º 80930, o desgaste da superfície é acentuado e com descoloração uniforme na faixa de trabalho com cerca de 20 mm em toda a extensão dos 360º do perímetro circunferencial do anel.

É notório um desgaste residual no rolamento do aerogerador n.º 80921. No entanto, este desgaste agrava-se nos rolamentos dos aerogeradores n.º 80926 e n.º 80930, que mostram alguma similaridade no tipo de falhas apresentadas. Através da inspeção visual, é possível retirar algumas conclusões:

- a falha em evolução dos rolamentos ter-se-á dado aquando da rutura da película lubrificante, devida à elevada fricção e consequentes gradientes térmicos. Um dos motivos apontados será o desalinhamento, comprovado através do espectro de frequências (fig.88);
- o fluido lubrificante poderá conter características insuficientes para as condições operacionais locais (nomeadamente a presença de condensações já demonstradas);
- o evidente fenómeno de corrosão poderá pressupor que a vedação atual é insuficiente de acordo com as condições locais. Por consequência, a vida útil do rolamento é reduzida drasticamente, sendo este efeito exponencial;
- o severo desgaste visualizado em ambos os anéis dos rolamentos acima indicados indicam uma fadiga superficial por excesso de carga do rolamento. Tal facto dever-se-á não só ao desalinhamento, provocando um desequilíbrio na distribuição das cargas, mas também à conversão da redução da folga radial interna do rolamento ou mesmo à folga radial interna inferior à necessária. Este facto interfere diretamente na lubrificação eficiente, pois, não existindo espaço, o lubrificante não forma a sua película entre os elementos rolantes e a pista. Logo, existindo um contacto por fricção entre metal – metal, a fadiga prematura do material será acelerada.

4.3.6 - Comparações de espectros nos rolamentos na zona do acoplamento

Apresentamos, de seguida, os espectros de vibrações excessivas nos rolamentos do gerador, sensor A, mostrado na figura 16, referentes ao lado do acoplamento (fig. 90).

Os resultados obtidos são ilustrativos das diferenças existentes entre defeitos na pista externa, na interna e nas esferas do rolamento em estudo.

Para ser possível distinguir nos espectros apresentados a origem do defeito, assinalaram-se os mesmos com cores diferentes – o cor-de-rosa indica problemas na esfera, o verde está relacionado com a pista externa e os defeitos na pista interna estão realçados a cor de laranja.

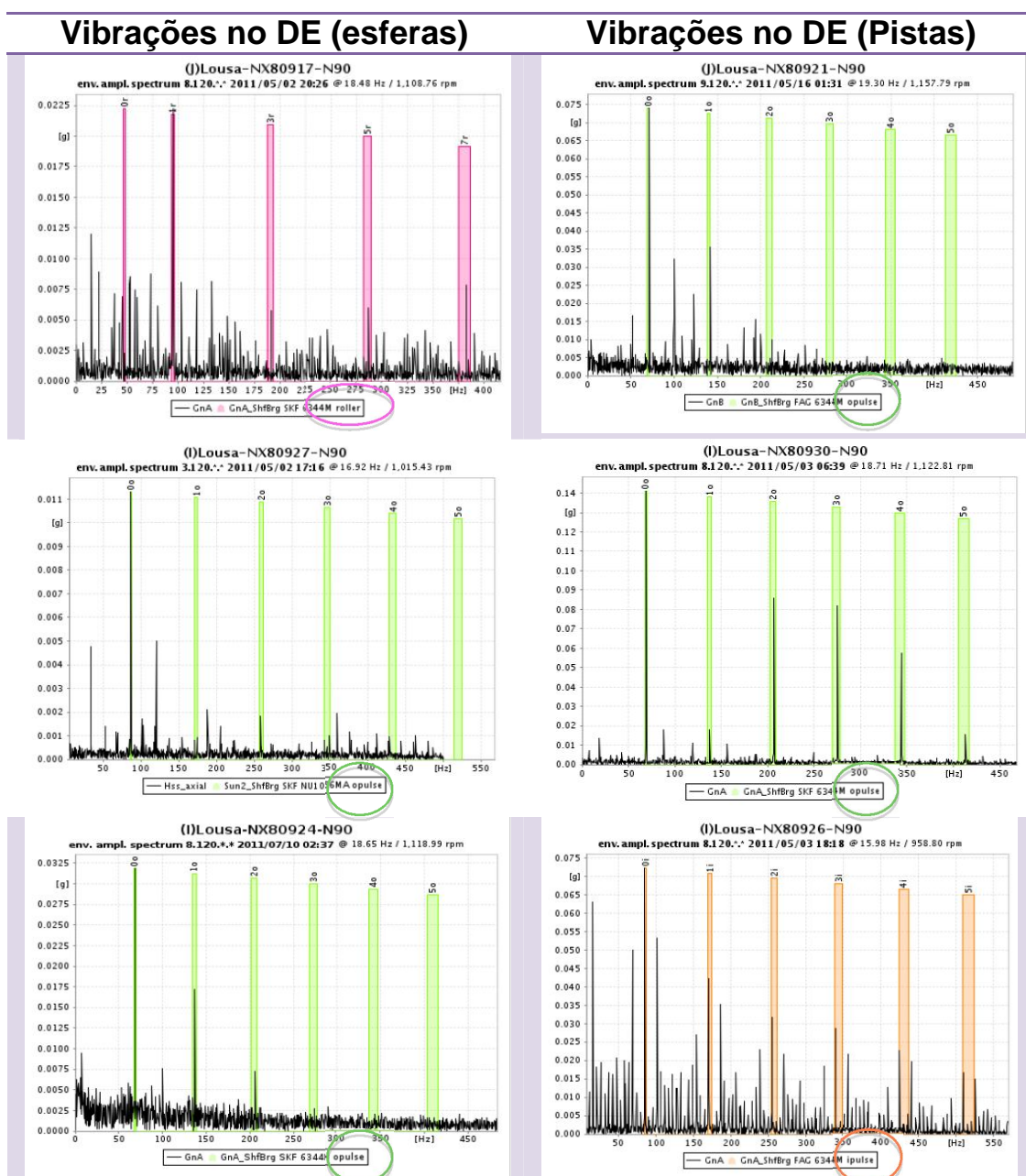


Figura 90 - Gráfico de comparação de amplitudes de vibração no gerador (DE)

Através dos gráficos apresentados, observamos que as vibrações surgem sempre nos rolamentos SKF 6344M/C3, os quais se encontram localizados no gerador do lado do acoplamento, o que sugere que existem algumas fragilidades no alinhamento do veio da caixa multiplicadora com a entrada no gerador.

4.3.7 - Conclusões e sugestões do parque eólico da Lousã

Podemos concluir que, no parque eólico da Lousã, existem algumas particularidades relativamente aos defeitos nos rolamentos do veio de alta velocidade e de entrada do gerador. O desgaste apresenta-se afastado da linha central de funcionamento do rolamento, indicando um nível severo de desalinhamento.

O alinhamento inadequado dá origem a cargas adicionais, gera vibrações e provoca avarias precoces nos rolamentos, nos sistemas de vedação e nas uniões de acoplamento; paralelamente, o desalinhamento induz um consumo adicional de energia.

Através do espectro de vibrações, é possível verificar que existe um desalinhamento, devido ao facto da 2.^a e da 3.^a harmónicas (fig. 88) serem superiores à frequência de funcionamento do veio.

As marcas de desgaste dos rolamentos estão fora do centro da pista interna. O desgaste irregular é causado por uma força axial como o desalinhamento, demonstrando que as esferas trabalham fora do centro, razão pela qual estas ficam opacas.

Por último, é de referir que não tratamos das questões relativas às análises de óleos, pelo facto de estes aerogeradores não apresentarem falhas nas caixas multiplicadoras, recorde-se que apresentam modelos diferentes.

Sendo os rolamentos elementos de alta solicitação, com componentes de elevada precisão, devem ser realizadas medidas de manutenção preventiva de forma a garantir o seu desempenho máximo. Deste modo, gostaríamos de deixar aqui a sugestão de se promover operações de verificação do alinhamento entre o veio de saída da caixa multiplicadora e o de entrada do gerador.

4.4 – Conclusões Gerais dos Parques Eólicos da Freita e Lousã

Este estudo permite-nos concluir que valores inferiores a 0,07 g, correspondentes às vibrações nos rolamentos do gerador, não devem ser motivo para se proceder a substituições, mas devem ser objeto de monitorizações através da realização de novas recolhas de vibrações, análises de óleos e de endoscopias.

Encontrámos algumas divergências entre os parâmetros dos dados cinemáticos reais e os introduzidos no *software* de monitorização de vibrações (CMS).

Verificámos que níveis de ferro elevados são indicadores de problemas em engrenagens e que, após o registo de amplitudes térmicas muito elevadas, estas devem dar origem a um alarme para que possa ser providenciada uma recolha extra de amostra de óleo.

As intervenções de manutenção em aerogeradores requerem recursos humanos especializados e cada deslocação a um parque eólico implica uma logística complexa e onerosa, pelo que o planeamento e otimização das visitas de manutenção devem ser previstos de forma racional. Nesta perspetiva e no sentido de eliminar substituições desnecessárias, foi desenvolvido um organograma que mostra a alteração de procedimentos relativos à manutenção preventiva condicionada utilizada atualmente.

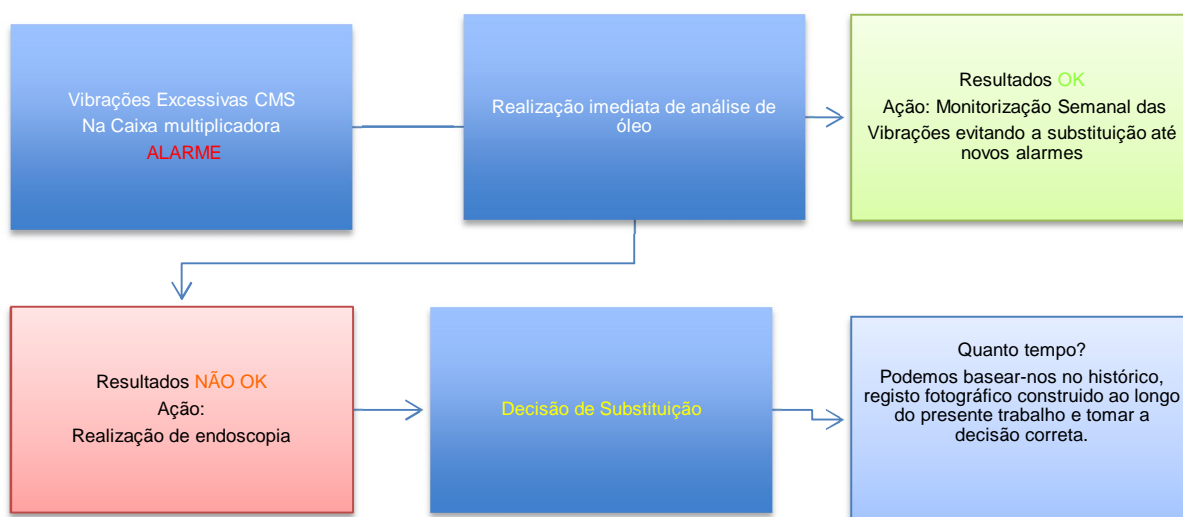


Figura 91 – Organograma da mudança de paradigma da manutenção em aerogeradores na caixa multiplicadora

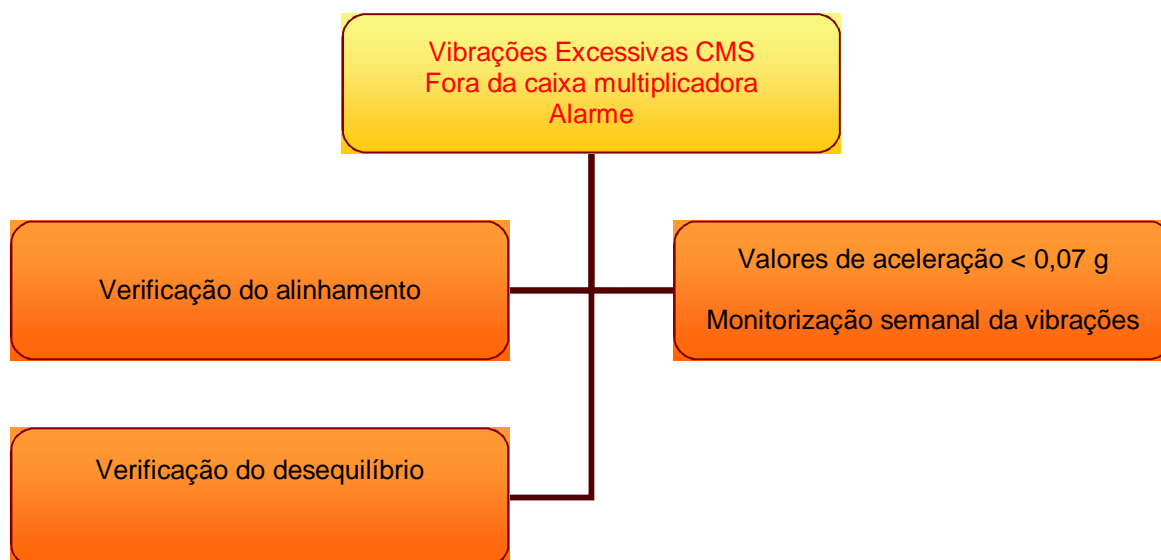


Figura 92 – Organograma da mudança de paradigma da manutenção em aerogeradores fora da caixa multiplicadora

Capítulo 5

Trabalho Experimental – TE 3 Meroicinha

5 - Trabalho Experimental – TE 3 Meroicinha

O trabalho experimental incide sobre a recolha de dados relativos às vibrações num aerogerador Vestas – V80, com o objetivo de avaliar o comportamento dinâmico da torre e interligar esses dados com o registo de avarias nos componentes mecânicos. Este foi selecionado por ser um dos que opera nas condições ambientais mais adversas e sujeito à presente avaliação com o intuito de se compreender se as vibrações a que a torre está sujeita, influenciam ou não as avarias que ocorrem nos componentes mecânicos.

Sabemos que as torres estão sujeitas a grandes solicitações provenientes do vento que atua diretamente sobre elas, e também por forças e momentos exercidos pelo funcionamento dos equipamentos no seu topo.

Estas estruturas são projetadas para resistir a cargas quer estáticas, quer dinâmicas, no entanto torna-se necessário considerar qual o efeito dinâmico da ação da pressão do vento na mesma, visto que esta está frequentemente sujeita à ação de vibrações provenientes do vento. É importante a monitorização da variação das frequências naturais quer para a análise da integridade da estrutura, quer para evitar ressonâncias. Uma vez excitada, a estrutura da torre propaga a energia vibratória pelas fundações e para a *nacelle*. Essas vibrações podem provocar ocorrer em situações de ressonância, que por sua vez, pode resultar em falhas prematuras a nível estrutural e também em componentes mecânicos.

Este trabalho experimental consiste em fazer uma análise do comportamento estrutural da torre devido às excitações dinâmicas, através da instalação de sete sensores de baixa frequência.

5.1 - Descrição do modelo Experimental

Neste trabalho foi estudado um aerogerador Vestas – V80, com 2MW de potência, apresentando um rotor com diâmetro de 80m com regulador de *pitch* que permite um ajustamento das pás às melhores condições do vento. Este aerogerador foi selecionado devido ao facto de operar nas condições climatéricas mais adversas, situado em Terras de Bouro, Vila Real.

Características do aerogerador utilizado no trabalho experimental:

- Altura do veio ao solo – 78 m
- Diâmetro das pás – 80 m
- Velocidade de arranque – 4 m/s
- Velocidade nominal – 18 m/s
- Velocidade de paragem – 25 m/s
- Velocidade de rotação – 9 a 19 rpm
- Velocidade de rotação nominal – 16,7 rpm
- Potência máxima – 2000 kW

Para o estudo em questão foram instalados equipamentos de medida e recolha de dados através de sensores colocados na chumaceira principal, na caixa multiplicadora, no gerador e na torre.

Os sensores instalados na torre têm como finalidade, o estudo de possíveis ressonâncias, e das mesmas poderem agravar os defeitos nos componentes mecânicos do aerogerador.

Este modelo começa a produzir energia a partir de uma velocidade de 5 m/s e a mesma é interrompida se ultrapassar os 25 m/s.

O estudo divide-se em duas partes, constando a primeira da análise de avarias através de um conjunto de sensores de vibrações instalados permanentemente nos equipamentos mecânicos, como mostrado na figura 93, e a segunda contempla o registo das respostas provenientes da torre eólica.

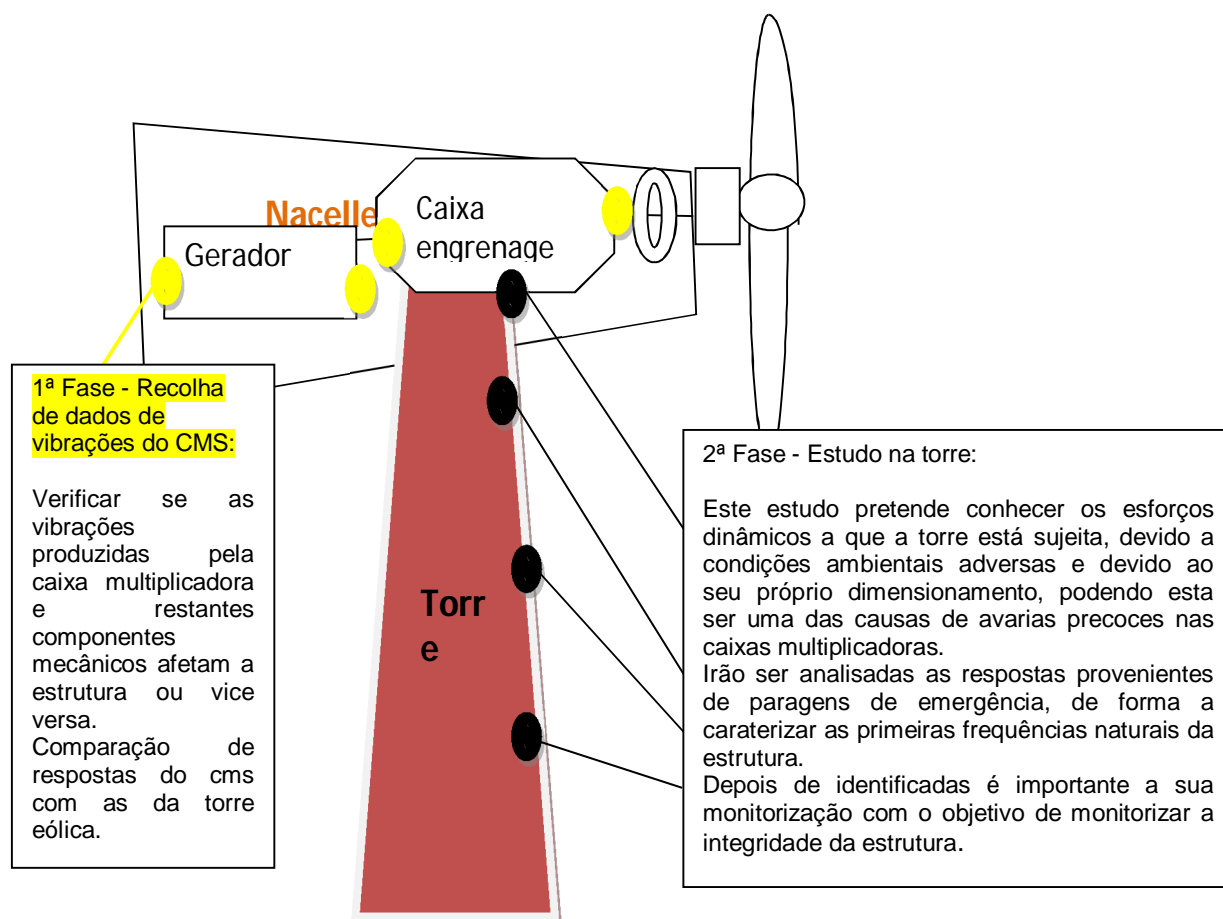


Figura 93 – Esquema das 2 fases do trabalho experimental - Meroicinha

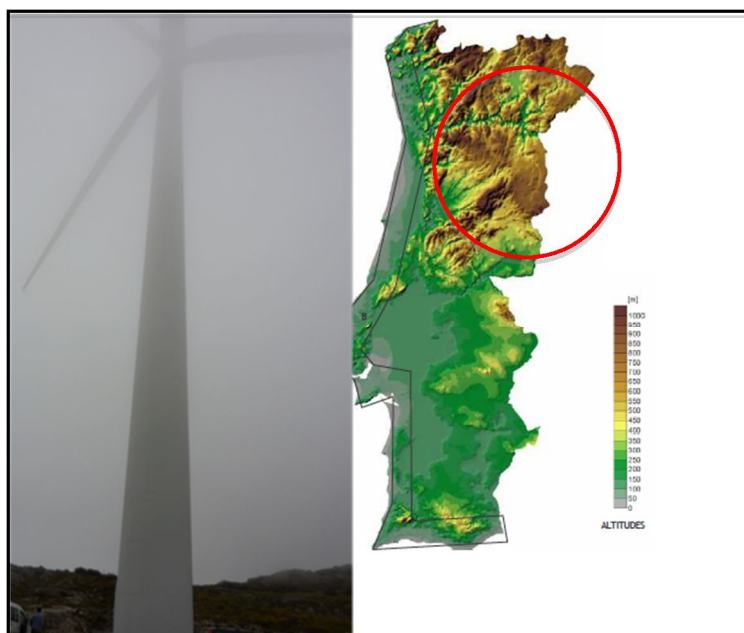


Figura 94 – Aerogerador nº3 em Meroicinha – Localização

5.2 Introdução de dados cinemáticos

De forma a ser possível a identificação das frequências de defeito dos rolamentos e dos vários estágios da caixa multiplicadora, foi necessário recorrer a cálculos utilizando as fórmulas descritas anteriormente, como pode ser observado nas figuras 25 e 28. Os ensaios decorreram a uma velocidade do rotor de 16,8 rpm, registe-se que o veio de alta velocidade à saída da caixa multiplicadora rodava a 1680 rpm, correspondendo a 28 Hz.

Características geométricas dos rolamentos

Designação: **SKF 230/630 CA/W3**
 Número de Esferas **N= 69**
 Diâmetro da Esfera **$P_d = 480$ mm**
 Diâmetro do Rolamento **$B_d = 61$ mm**
 Ângulo de Contacto **$\beta = 0^\circ$**

Cálculo da frequência de defeito na gaiola

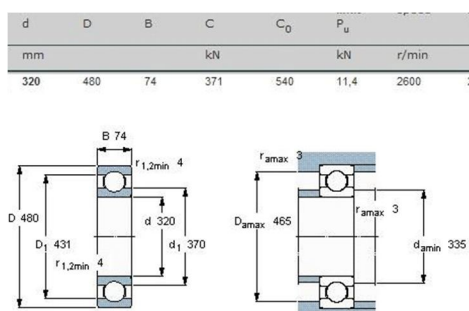


Figura 95 – Caraterísticas técnicas do rolamento skf 230/630

FTF	12,5	Hz
Bd	61	
Pd	480	
Bd/Pd	0,13	
RPM	1680	Vel. Ensaios
Pd/Bd	7,9	

Tab. 16 Cálculo frequência defeito na gaiola FTF

Através da figura 96 é possível observar a amplitude de 12,98 mm/s² a 12 Hz, correspondendo à frequência de defeito da gaiola do rolamento SKF 230/639.

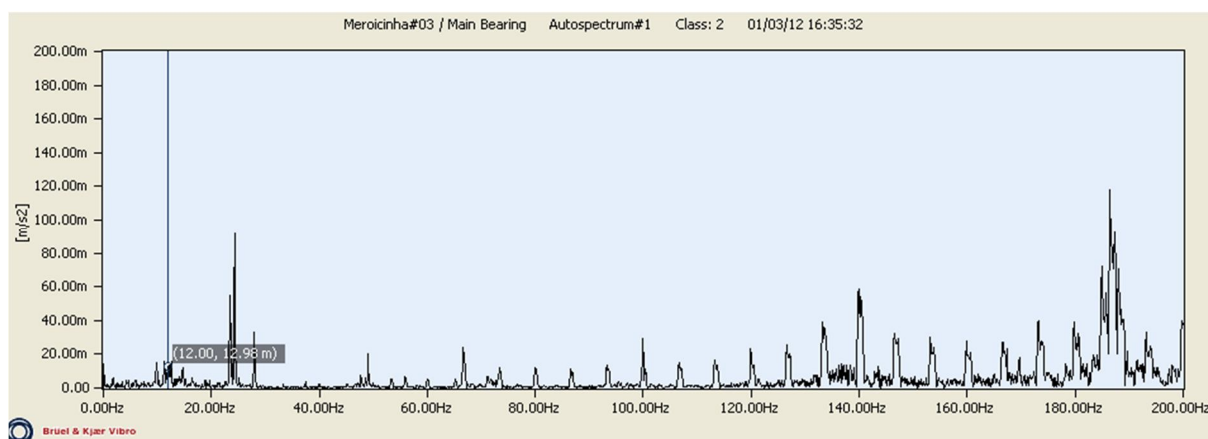


Figura 96 – Espectro de frequências do CMS – 12 Hz Freq. defeito da gaiola

Nas tabelas que se seguem são apresentadas as frequências de defeito dos rolamentos e de engrenamento da caixa multiplicadora.

As informações técnicas sobre as características das rodas dentadas de cada engrenagem e rolamentos de cada estágio, nomeadamente número de dentes, rolos, esferas, diâmetros interno e externo, ângulo de contato, encontram-se no anexo C.

Dados cinemáticos - rolamentos da caixa multiplicadora – veio alta velocidade			2X	3X	4X
BPFI	Freq. defeito Pista Interna	61 Hz	122 Hz	183Hz	244Hz
BPFO	Freq. defeito Pista Externa	40 Hz	80 Hz	120Hz	160Hz
BSF	Freq. defeito Esfera	31 Hz	62 Hz	93 Hz	124Hz
FTF	Freq. defeito Gaiola	2,6 Hz	5,2Hz	8Hz	10,7Hz

Tab. 17 – Cálculo das frequências de defeito dos rolamentos da caixa multiplicadora

Dados cinemáticos - rolamentos da caixa multiplicadora – Veio baixa veloc.			2X	3X	4X
BPFI	Freq. defeito Pista Interna	9 Hz	18 Hz	27Hz	36Hz
BPFO	Freq. defeito Pista Externa	8,1 Hz	16,2Hz	24,4Hz	32,5Hz
BSF	Freq. defeito Esfera	5,4 Hz	11 Hz	16,5Hz	21,9Hz
FTF	Freq. defeito Gaiola	0,1 Hz			

Tab. 18 – Cálculo das frequências de defeito dos rolamentos da caixa multiplicadora veio de baixa velocidade

Dados cinemáticos engrenagens da caixa multiplicadora			2X	3X	4X
TMF – 1º Estágio	Frequência de engrenamento -1	24,2Hz	48,4Hz	72,4Hz	96,6Hz
TMF – 2º Estágio	Frequência de engrenamento -2	189Hz	378Hz	567Hz	756Hz
TMF – 3º Estágio	Frequência de engrenamento -3	616Hz	Hz	Hz	Hz
Sun		3,8 Hz			
Ring	Anel	0,8Hz	1,6Hz	2,4Hz	3,4Hz
Planet	Planetario	1,5Hz	3 Hz	4,4	5,7Hz

Tab. 19 – Cálculo das frequências de defeito das engrenagens da caixa multiplicadora

Dados cinemáticos dos rolamentos do gerador			2X	3X	4X
BPMI	Pista Interna	151,5Hz	303Hz	454Hz	606Hz
BPMO	Pista Externa	99,7Hz	200Hz	300Hz	400Hz
BSF	Esfera	132Hz	265Hz	397Hz	530Hz
FTF	Gaiola	11,1Hz	22,1Hz	33,2Hz	44,3Hz

Tab. 20 – Cálculo das frequências de defeito dos rolamentos do gerador

Defeitos elétricos 50 Hz, 100 Hz, 200 Hz e 300 Hz

Tab. 21 – Cálculo das frequências de defeitos elétricos

5.3 Descrição do Modelo Físico e Instalação de Sensores na Torre

No trabalho experimental foram seleccionadas as três direções x,y e z para as recolhas.

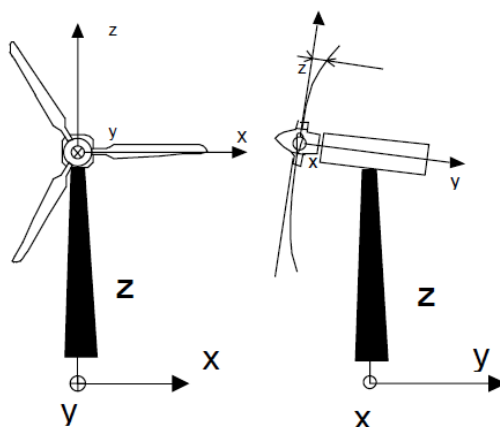


Figura 97 – Simplificação do modelo e direções da recolha de dados da estrutura

A torre eólica de aço apresenta formato cónico vazado dividido em três secções. A primeira possui uma altura de 10,7m, onde estão instalados 2 sensores nas direções x e y (identificados por x1 e y1), como é possível verificar na figura 98, a segunda a 33,7m também tem em x e y (identificados por x2 e y2), observe-se na figura 99, e uma terceira a uma altura de 56,9m, esta com três sensores em x, y e z (identificados por x3,y3 e z3), observar a figura 100, sendo estes colocados nas plataformas por uma questão de acessibilidade.

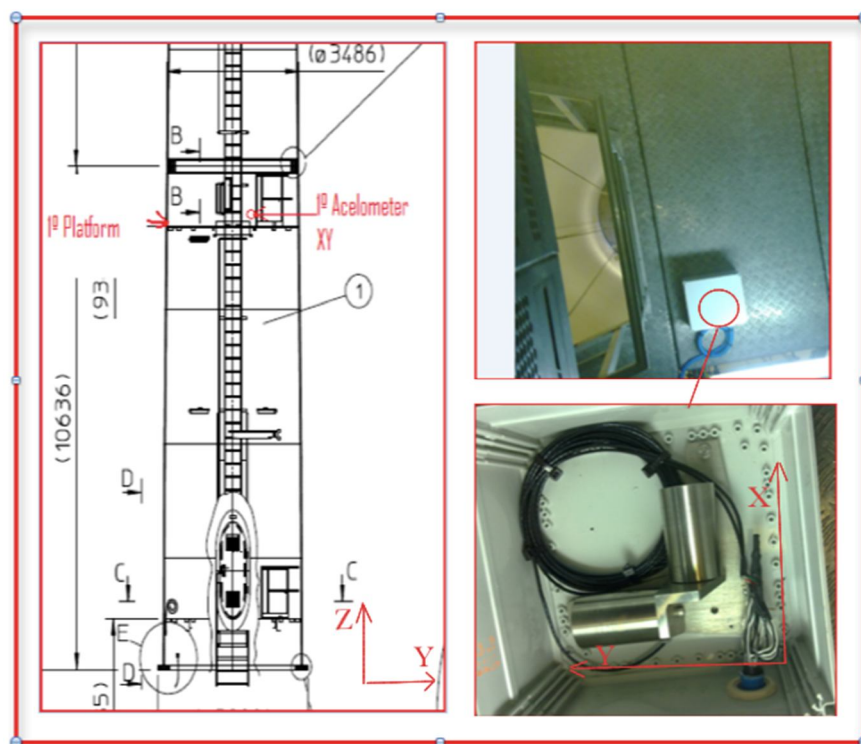


Figura 98 – Localização dos sensores na 1ª plataforma – 10,6m

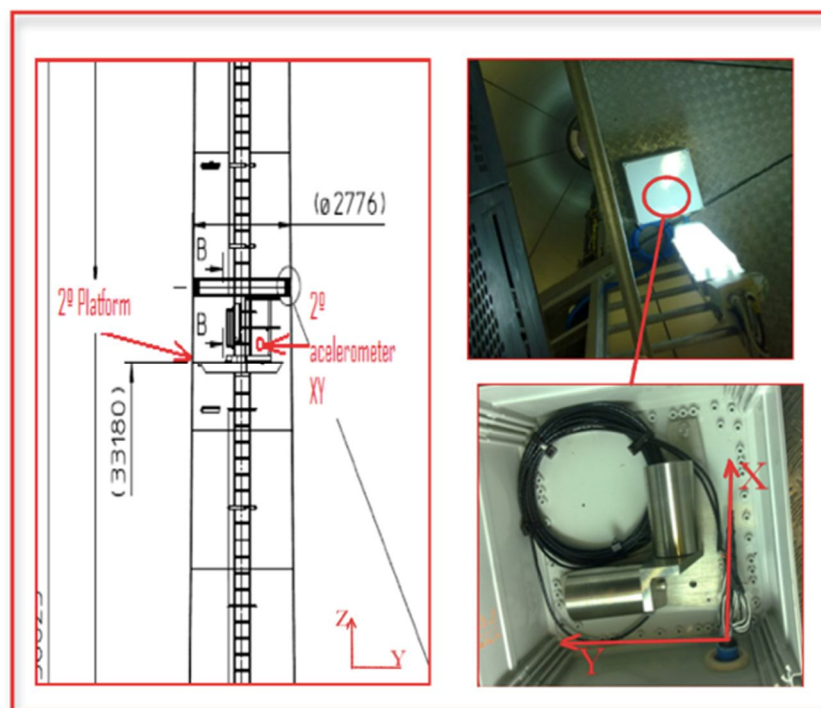


Figura 99 – Localização dos sensores na 2ª plataforma – 33,18 m

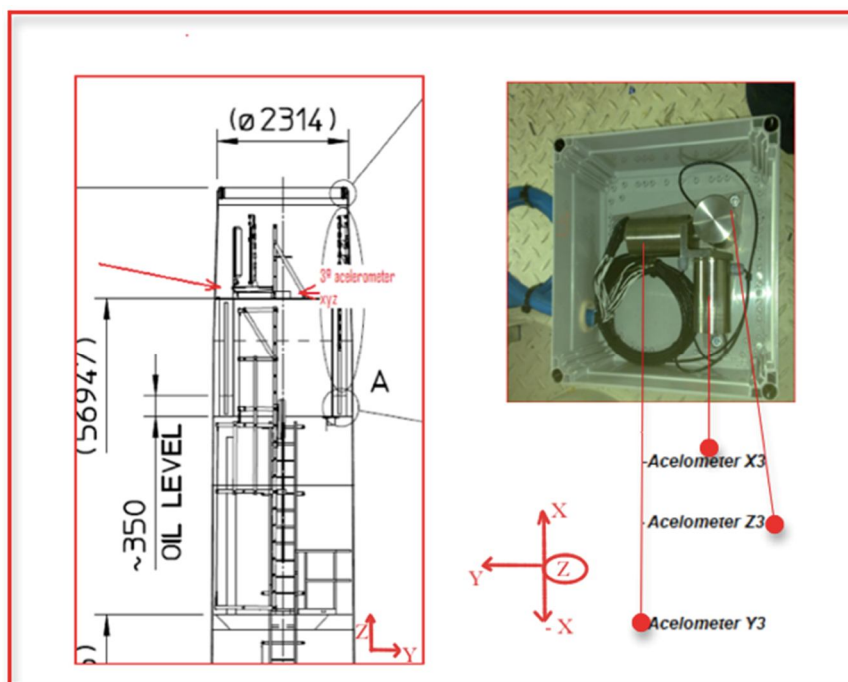


Figura 100 – Localização dos sensores na 3ª plataforma – 56,9m

5.4 1º Fase do Trabalho Experimental

Depois de instalados os sensores nos vários componentes mecânicos, através da figura 101 é possível observar que foi detetado um alarme de valores globais pelo CMS proveniente do sensor (*Main*, fig.16), no dia 10 de janeiro de 2011, tendo-se registado nesse dia uma velocidade máxima de vento (13 m/s). No dia 27 de janeiro do mesmo ano procedeu-se à inspeção do rolamento SKF 230/630 CA/W3, através de endoscopia inserindo a sonda na chumaceira principal (*main bearing*), onde nada de anormal foi detetado. Até ao momento da presente inspeção o aerogerador tinha 20.663.797 kW de produção, contabilizando cerca de 30.000h.

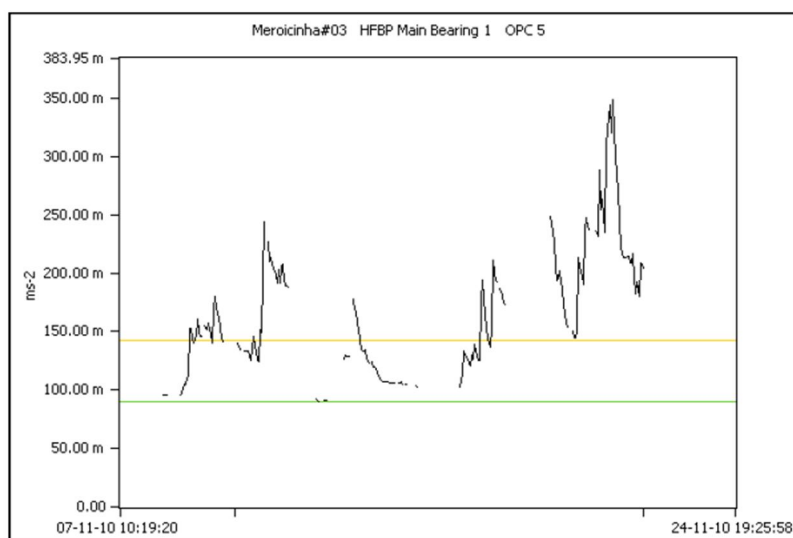


Figura 101 – Valores de alarme no aerogerador nº3 – Níveis globais de vibração

Após o resultado da endoscopia constata-se que existem falsos alarmes provenientes do CMS, com objetivo de desmistificar essas vibrações procedeu-se à recolha das frequências na torre, pressupondo que estas possam contribuir para o aumento das vibrações nos componentes mecânicos, originando falsos alarmes. Não deve ser descuidado o facto das recolhas de vibrações dos componentes mecânicos assentes numa base que se movimenta a uma altura próxima dos 100 metros, pois todo o conhecimento de análise de vibrações em que foram desenvolvidos os CMS baseiam-se em experiências de recolhas em apoios fixos.

5.4.1 - Recolha de dados do CMS e Torre

Em julho de 2010 deu-se início à recolha dos dados provenientes dos sensores do CMS, passado um ano já era possível observar também as respostas dos sensores instalados na torre.

Foi necessário proporcionar uma coincidência de datas para a comparação dos dados, sendo que os da torre eram recolhidos e armazenados quinzenalmente e os do CMS semanalmente. Depois de feita essa coincidência compararam-se dados do CMS e da torre [Anexo B.2]. Note-se, que esta opção de recolhas pontuais (semanalmente e quinzenalmente) prendeu-se com o facto de tornar possível o armazenamento do grande volume de dados proveniente de ambas as recolhas. Na figura 102 é possível observar uma amostra de duas horas de dados relativos a velocidades de ventos, direção e potência. Foi ainda necessária uma pormenorizada análise de dados recolhidos durante o período de três anos, por forma a encontrar velocidades de vento semelhantes. [Anexo B.1].

PCTimeStamp	WTG03_WindSpeed	WTG03_WindDir	WTG03_Temp.	Production Power
11/07/15 13:00	8,3	129,6	20	545,8
11/07/15 13:10	8,8	116,6	20	636,9
11/07/15 13:20	8,9	120,6	21	654,1
11/07/15 13:30	8,9	117,7	20	684
11/07/15 13:40	8,4	114,5	21	570
11/07/15 13:50	8,6	126,9	21	617,5
11/07/15 14:00	9	128,3	21	710,9
11/07/15 14:10	9,7	119,7	21	894,6
11/07/15 14:20	9,8	128,1	21	952,6
11/07/15 14:30	10,1	123,4	21	970,2
11/07/15 14:40	9,8	119,4	21	921,3
11/07/15 14:50	9,2	129,8	21	788,6
11/07/15 15:00	10,1	126,6	21	975,8

Figura 102 – Amostragem de duas horas de velocidade e direção do vento

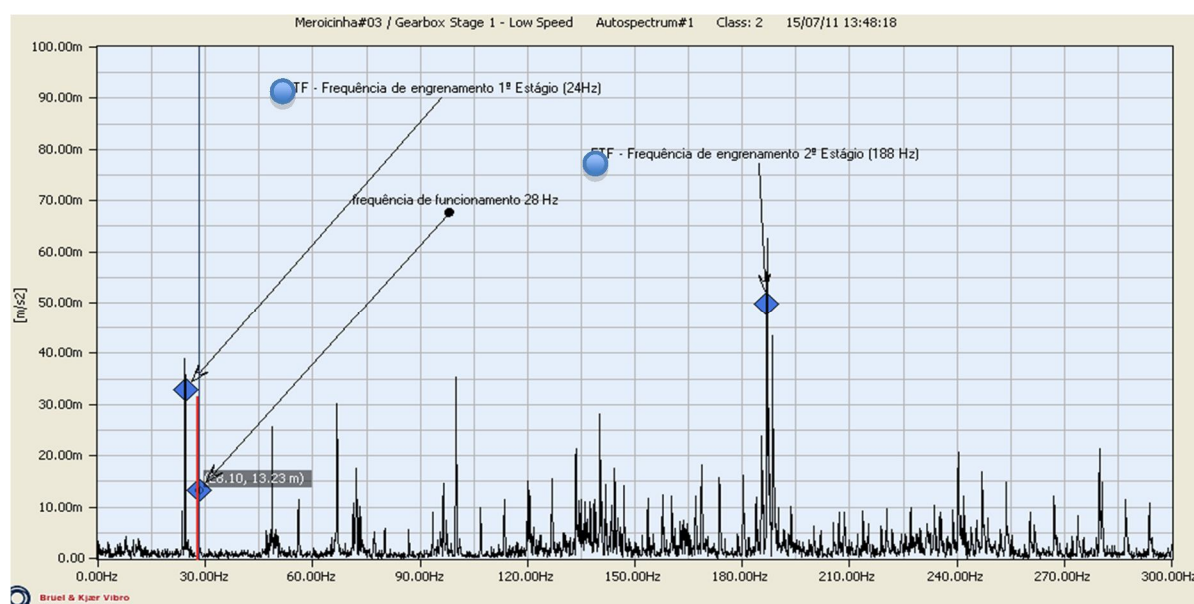
Brüel & Kjær Vibro						
Park Overview Software CMS Trend Data Brüel & Kjær Vibro Condition Monitoring Service User Settings Help						
Chiqueiro	Meroicinha#03-2012-08-17-23-59-10_Bin_2_ActPwr_790.uff.zip	RML-03M4071-150610-BKV-00001	18 Aug 2012, Sat	6799	9	
Lagoa Funda	Meroicinha#03-2012-08-10-17-43-17_Bin_2_ActPwr_847.uff.zip	RML-03M4071-150610-BKV-00001	10 Aug 2012, Fri	6684	New!	
Meroicinha	Meroicinha#03-2012-08-03-14-28-26_Bin_3_ActPwr_1195.uff.zip	RML-03M4071-150610-BKV-00001	03 Aug 2012, Fri	6719	New!	
Park Alarm Status	Meroicinha#03-2012-07-04-23-45-41_Bin_4_ActPwr_1633.uff.zip	RML-03M4071-150610-BKV-00001	05 Jul 2012, Thu	6583	New!	
Meroicinha#03	Meroicinha#03-2012-06-27-16-38-43_Bin_2_ActPwr_732.uff.zip	RML-03M4071-150610-BKV-00001	27 Jun 2012, Wen	6737	New!	
TWFF Files	Meroicinha#03-2012-06-20-09-51-51_Bin_3_ActPwr_1025.uff.zip	RML-03M4071-150610-BKV-00001	20 Jun 2012, Wen	6723	New!	
KIN Files	Meroicinha#03-2012-06-12-11-15-53_Bin_5_ActPwr_1974.uff.zip	RML-03M4071-150610-BKV-00001	12 Jun 2012, Tue	6872	New!	
Measurement Requests	Meroicinha#03-2012-06-05-06-15-22_Bin_2_ActPwr_744.uff.zip	RML-03M4071-150610-BKV-00001	05 Jun 2012, Tue	6847	New!	
Alarm Status	Meroicinha#03-2012-05-28-16-26-18_Bin_2_ActPwr_758.uff.zip	RML-03M4071-150610-BKV-00001	28 May 2012, Mon	6768	New!	
TodoMundo						

Figura 103 – Acesso ao dados espectrais dos componentes mecânicos BKV do CMS

5.4.1.1 - Comparação de resultados do CMS com Torre

No seguimento das recolhas de dados foi necessário encontrar velocidades de vento semelhantes¹⁶, só assim foi possível comparar vibrações nos componentes mecânicos (fig.104) e na torre (fig.105) ambas com velocidades de vento aproximadamente de 8 m/s.

Nas figuras seguintes (104 e 105) é possível observar que as frequências dos componentes mecânicos transmitem-se à estrutura (torre) e fazem se sentir com maior amplitude nos pontos mais elevados da torre.

Figura 104 – Espectro de frequências do CMS – Amplitudes $F_{\text{funcionamento}}$ e TMF_{1° e 2° estágio

¹⁶ Ver anexo B

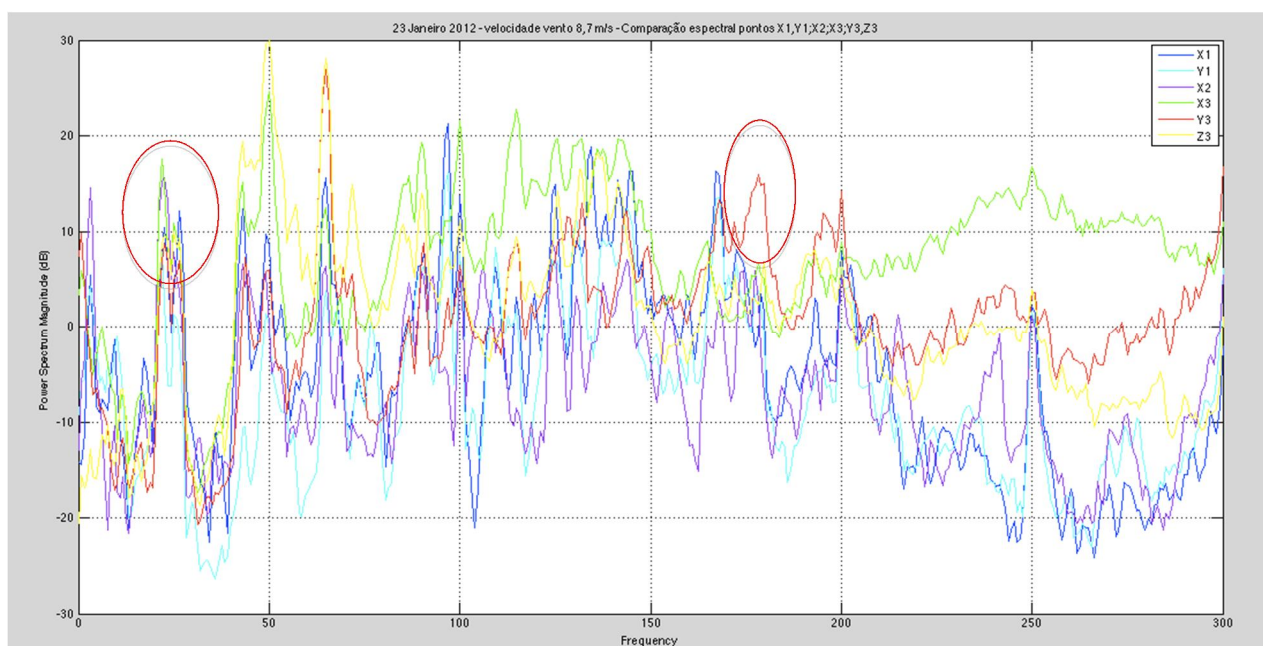


Figura 105 – Espectro (power density) dos sensores dos vários pontos da torre

De seguida foram comparadas as frequências do dia 17 de agosto de 2011 com uma velocidade de vento de 9,2 m/s, na caixa multiplicadora (fig.106) e as frequências provenientes da torre (fig.107) no dia 31 de janeiro de 2012, com velocidade de vento de 9,4 m/s.

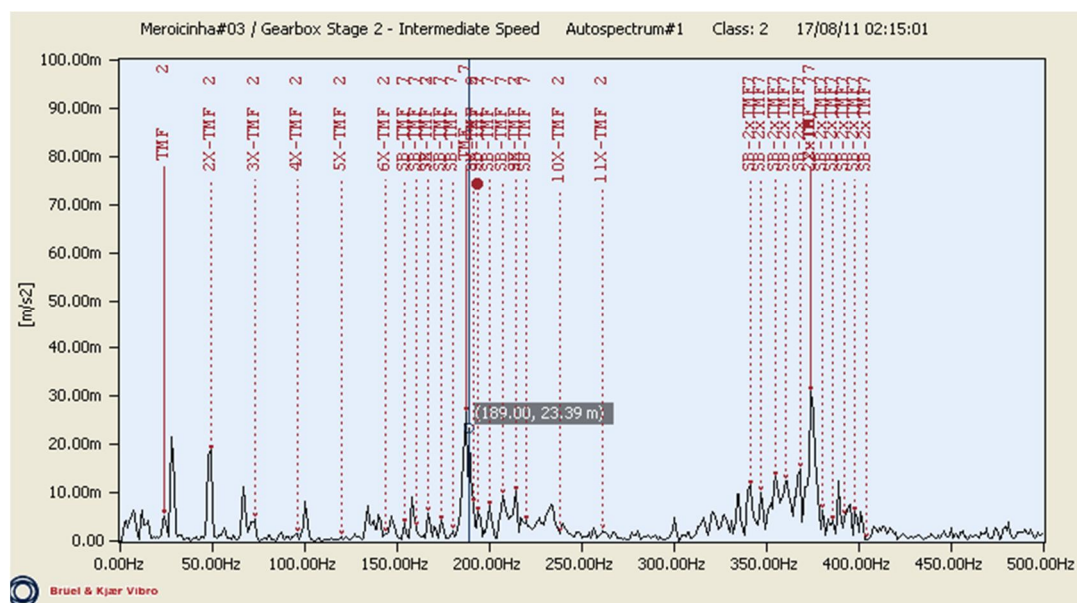


Figura 106 – Espectro de frequências do CMS - Amplitudes $F_{\text{funcionameto}}$ e TMF_{1° e 2° estágio

Através da figura 107 verifica-se que as frequências dos componentes mecânicos transmitem-se à estrutura, nomeadamente a 24,2 Hz corresponde à frequência do 1º estágio de engrenamento, 28 Hz corresponde à frequência de funcionamento, 48, 72 e 96 Hz harmônicas da frequência de engrenamento no 1º estágio, e todas elas fazem-se sentir com maior amplitude no ponto mais elevado da torre (x3).

Deve ser realçada a zona de baixas frequências, onde surgem amplitudes com alguma expressão a frequências que não correspondem aos dados cinemáticos dos componentes mecânicos, é também de notar que é nos pontos x2 e x1 que a resposta é mais elevada.

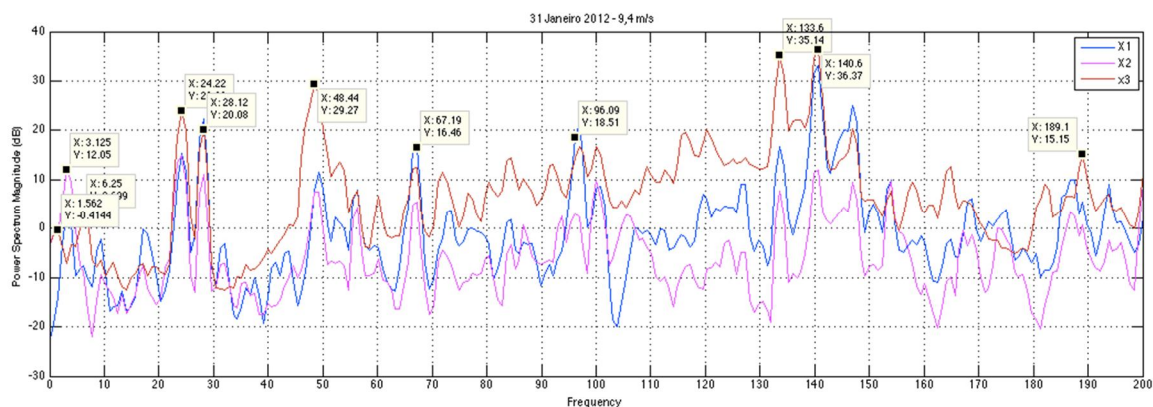


Figura 107 – Espectro (power density) dos sensores dos vários pontos da torre – x1,x2 e x3

Na figura 108 são comparadas as amplitudes de resposta da torres nos vários pontos x1, y1, x2, x3, y3 e z3, onde é possível observar que as direções x obtêm respostas mais elevadas do que as direções y.

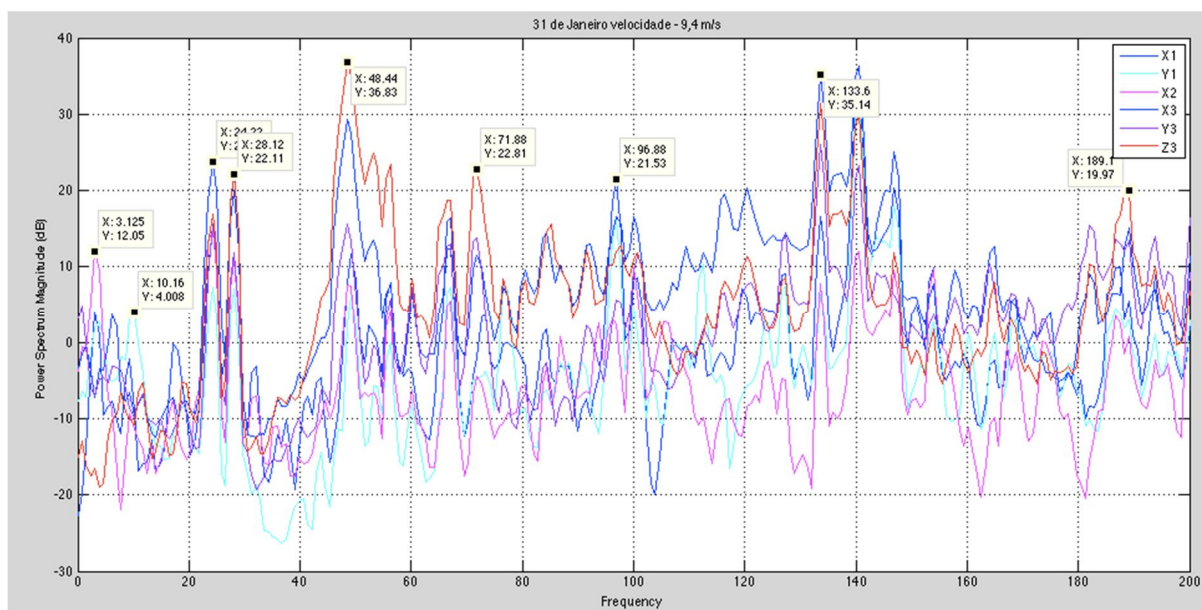


Figura 108 – Espectro (power density) dos sensores em todos os pontos 1, 2 e 3

Neste espectro é possível observar que surgem diversas frequências que não se consegue relacionar com os dados cinemáticos. A frequência de 3,12Hz apresenta maior amplitude em x2, situado a 33m de altura, segue-se a 10 Hz com maior expressão no ponto y1, situado a 10,7m. Relativamente às frequências conhecidas, tais como a de funcionamento e engrenamento é notório que apresentam em x3, o dobro das amplitudes do que em x1.

Nas altas frequências é onde os pontos x1, y1 e x2, começam a distinguir-se dos pontos localizados no topo da torre eólica.

Através das figuras 109 e 110 é possível observar que o comportamento da torre de suporte dos componentes mecânicos influencia a resposta do CMS, através das mesmas constata-se que com velocidades de vento inferiores, surgem maiores amplitudes no espectro nas baixas frequências, note-se que no dia 15 de julho de 2011, para uma velocidade de vento 8 m/s, a amplitude à frequência de engrenamento do 1º estágio (24 Hz) era de 9,63 mm/s², enquanto que, para uma velocidade de vento superior 9,5 m/s, registou-se para o mesmo ponto o valor de amplitude 5,1 mm/s². Relativamente às outras frequências, a de funcionamento, a do segundo e terceiro estágio de engrenamento apresentam os valores esperados, ou seja, para maiores velocidades de vento, registo de amplitudes mais elevadas.

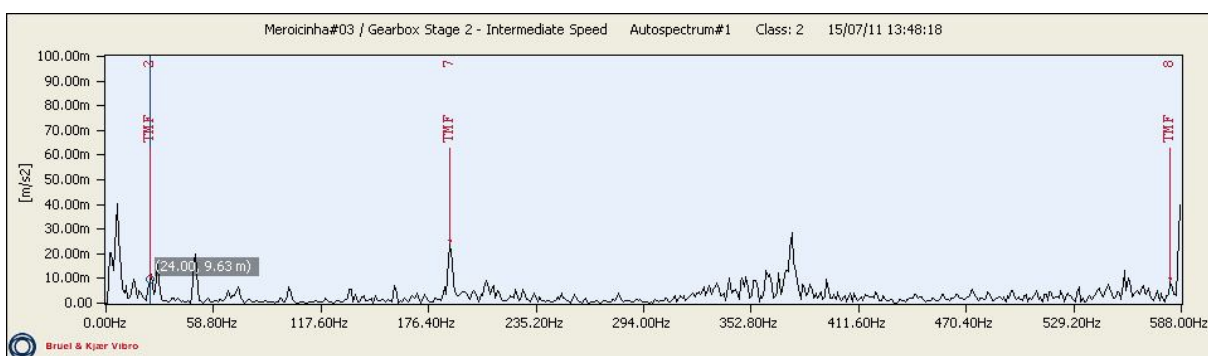


Figura 109 – Espectro do 2º estágio engrenamento para vento de 8m/s

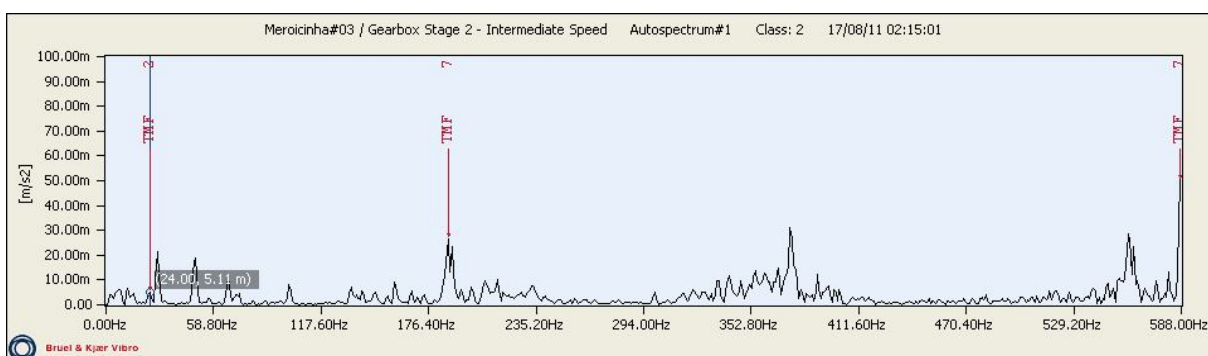


Figura 110 – Espectro do 2º estágio engrenamento para vento de 9,5 m/s

Dados cinemáticos (intermediate speed) – <i>Registo de Amplitudes em mm/s²</i>			1º TMF (24Hz)	2ª TMF (188 Hz)	3ªTMF (588Hz)
Data	Velocidade do vento	F.funcionamento (28 Hz)			
15 – 07 – 2011	8 m/s (689 kW)	15,58 mm/s ²	9,6 mm/s ²	24 mm/s ²	41 mm/s ²
17 – 08 – 2011	9,5 m/s (782 kW)	21,53 mm/s ²	5,1 mm/s ²	26 mm/s ²	83 mm/s ²
03 – 11 – 2011 (<i>anexo A.2</i>)	15,5 m/s (1998 kW)	27,46 mm/s ²	9,7 mm/s ²	32 mm/s ²	124 mm/s ²

Tab. 22 – Registo das amplitudes para velocidades de vento diferentes

Através do gráfico (fig.111) é possível observar que no dia 15 de julho de 2011, para uma velocidade de vento 6,5 m/s, no ponto mais alto da torre são apresentadas maiores amplitudes nas altas frequências, contudo é notório que a 24 Hz a amplitude é superior à de 28 Hz, sendo este um parâmetro que pode influenciar os valores das amplitudes obtidas (ver tabela 22). Apenas é possível apresentar este gráfico para o dia 15 de julho.

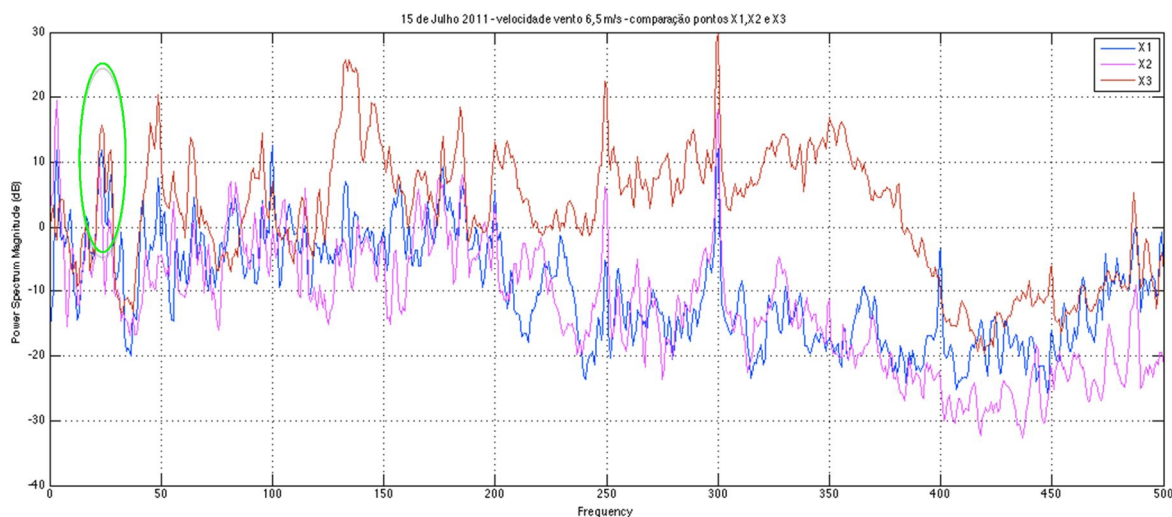


Figura 111 – Espectro (power density) dos sensores em todos os pontos x1,x2 e x3

Através do gráfico (fig.112) é possível observar que, para velocidades de vento iguais a 6,5 m/s no mesmo sensor x3, mas em dias distintos, a resposta da estrutura é diferente apenas pela alteração da direção do vento, registrando as maiores amplitudes no dia 15 de julho de 2011.

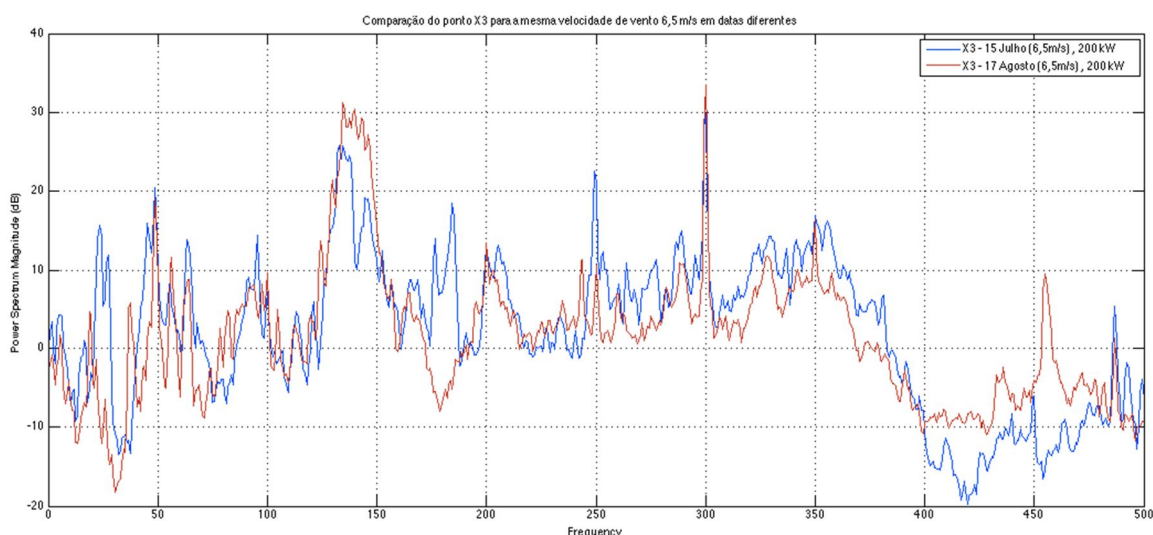


Figura 112 – Espectro (power density) sensor x3 para dias diferentes mas com velocidade vento igual

Verifica-se que a resposta da torre no ponto x2 (sensor x2) não sofre grandes alterações devido a mudanças na direção do vento nas mesmas condições do gráfico anterior, ou seja, para velocidades de vento iguais 6,5 m/s, mas em dias diferentes. Podemos constatar que o ponto mais alto da torre (x3) sofre as maiores alterações nas baixas frequências, podendo contribuir para a variação da resposta no CMS.

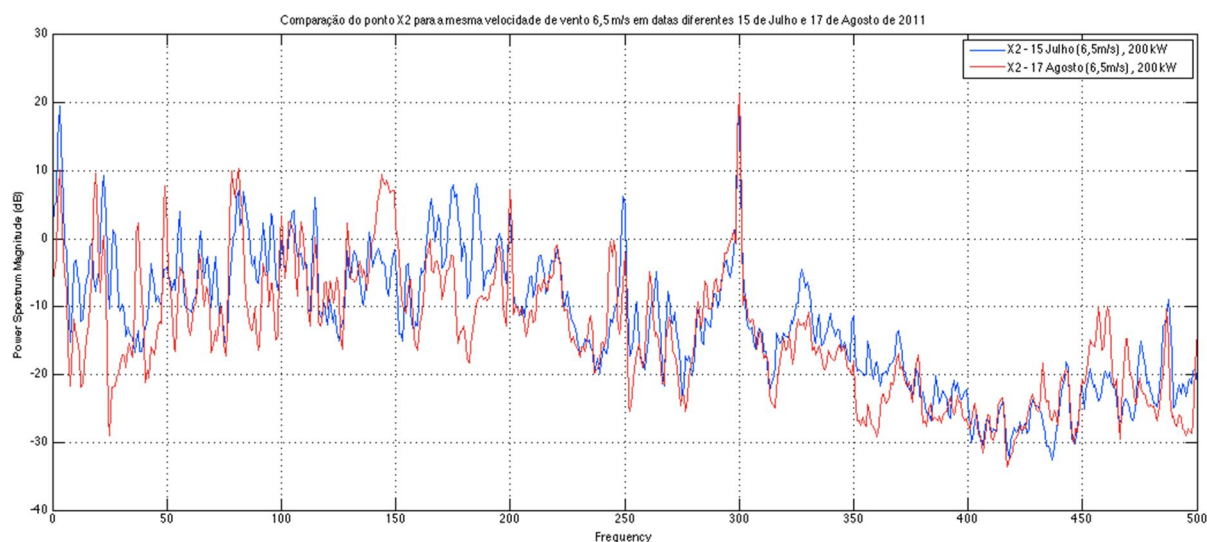


Figura 113 – Espectro (power density) sensor x2 para dias diferentes mas com velocidade vento igual

Em anexo (A3) pode-se observar o registo da variação do vento e sua direção no momento das recolhas efetuadas, com intervalos de tempo de 10 minutos.

5.5 - Análise de dados – Torre Eólica

Os métodos que se descrevem neste módulo desenvolvem-se no domínio da frequência, e baseiam-se em análises espectrais da resposta da estrutura, medidas em vários pontos ao longo da mesma (torre). Serão apresentados alguns conceitos básicos sobre a análise no domínio da frequência, associados ao conceito de série de Fourier.

Segundo (Rodrigues, 2004), a partir das séries temporais das acelerações observadas, não é possível obter muita informação sobre uma dada estrutura: apenas a duração da observação, o intervalo de tempo entre os pontos medidos (frequência de amostragem) e os valores máximos de aceleração. No entanto, a simples decomposição em “ondas” de um registo de acelerações, medido num determinado ponto de uma estrutura, utilizando por exemplo o conceito associado às séries de Fourier, possibilita o acesso imediato aos valores de frequência, para os quais uma dada estrutura mostra preferência em vibrar.

No seguimento das recolhas dos sinais provenientes dos vários pontos ao longo da torre, procedeu-se ao tratamento do sinal e respetivas transformadas de Fourier através da ferramenta Matlab. O MATLAB é um ambiente de programação que se baseia numa linguagem simples e acessível mas muito útil em termos matemáticos e processamento de sinais [52].

Na figura 114 apresentam-se os primeiros modos de vibração, segundo [31], admitindo viga encastrada e com adição de massa.

O cálculo dos modos de vibração, segundo o fabricante, incluiu a adição de massas concentradas, correspondentes aos equipamentos mecânicos e elétricos instalados no topo da torre.

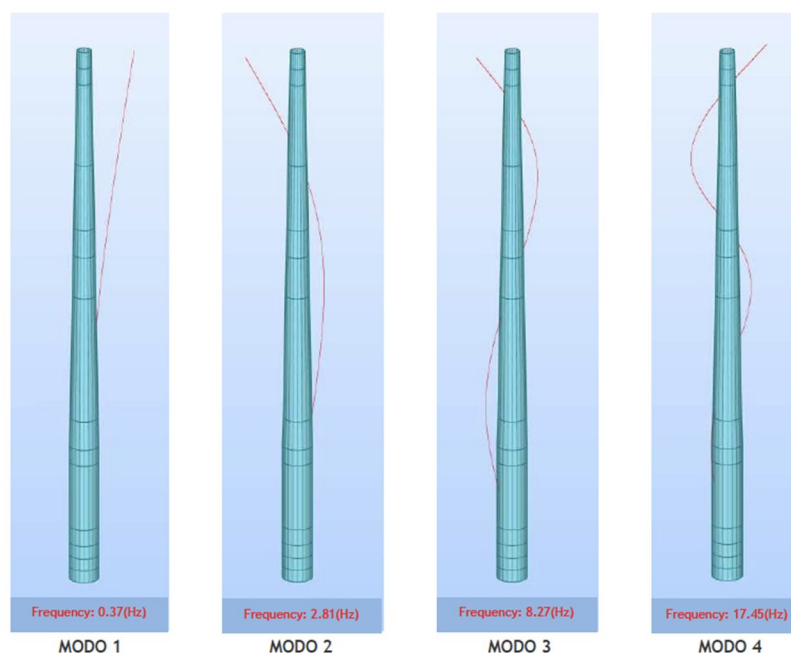


Figura 114 – Modos de vibração e frequências naturais da estrutura calculados pelo fabricante

5.6 2º Fase do Trabalho Experimental - Torre

Nos dias 17 e 31 de agosto de 2012 foram realizadas duas paragens de segurança no aerogerador nº3 em Meroicinha, com o intuito de simular as paragens devidas à ação de ventos superiores a 25 m/s e assim permitir o conhecimento das respostas da estrutura e assim podermos identificar frequências naturais.

As medições anteriores serão correlacionadas, em cada instante, com os parâmetros de funcionamento, tais como: velocidade do vento ao nível do topo da torre; direção da *nacelle*, velocidade das pás e respetivo ângulo (“*pitch*”).

As condições nos momentos dos ensaios são apresentadas nas figura 115 e 116, para os dias 17 e 31 de agosto respetivamente.

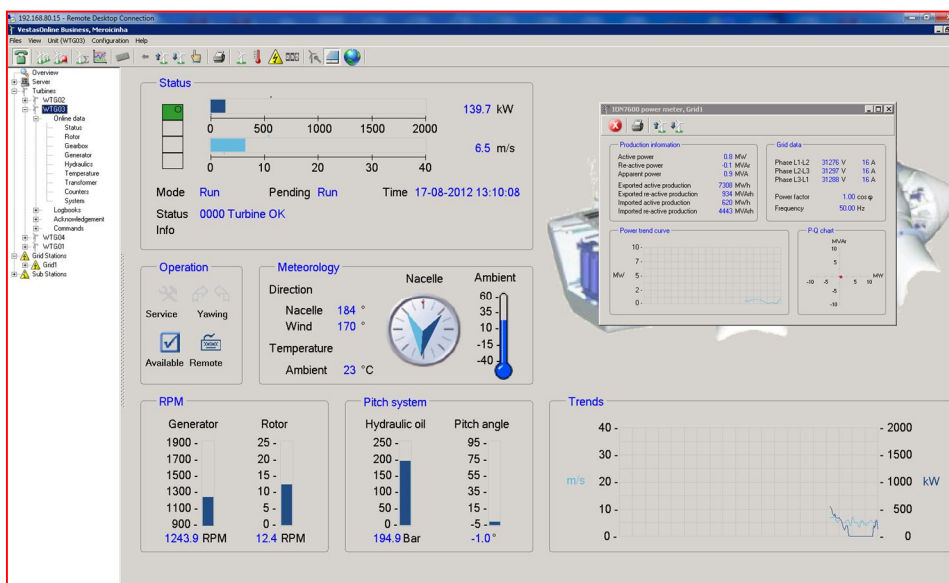


Figura 115 – Registo das condições do ensaio durante a paragem 17 Agosto

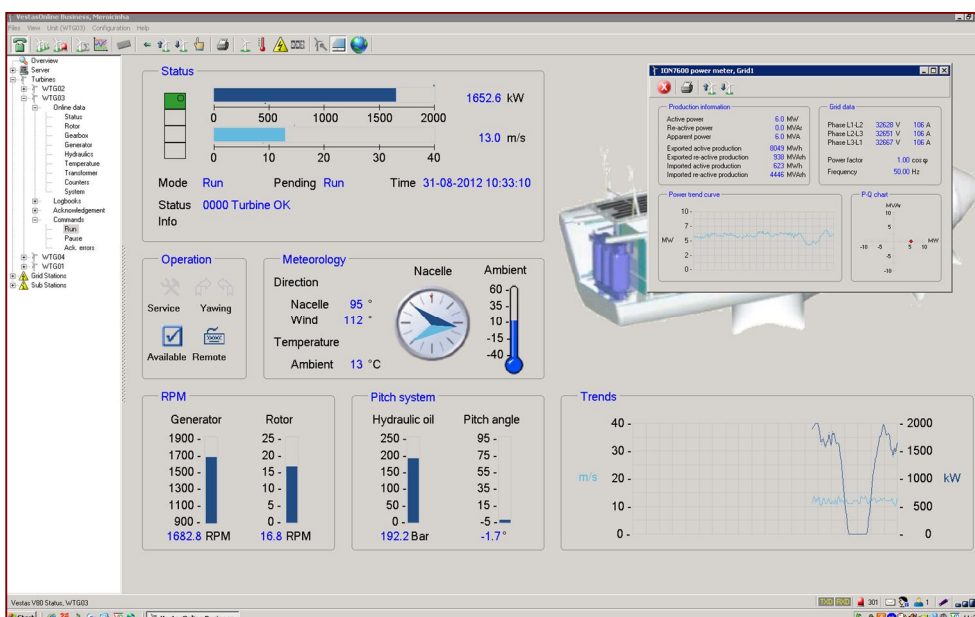


Figura 116 – Registo das condições do ensaio durante a paragem - 31 Agosto

Após as referidas paragens trataram-se os dados em Matalab, de realçar que apenas se produziram as transformadas de Fourier na janela marcada a vermelho, correspondente a 20 s dos 81,92 s em que o aerogerador se manteve sem produção.

Na figura 117 é possível observar um desfaseamento entre janelas (20s), mas existiu a preocupação de apenas trabalhar as células em *Matlab* em que o aerogerador deixou de produzir.

Foram seleccionados os dias 17 e 31 de agosto pelo facto de apresentarem velocidades de vento bastante distintas 5,6 m/s e 13 m/s respetivamente.

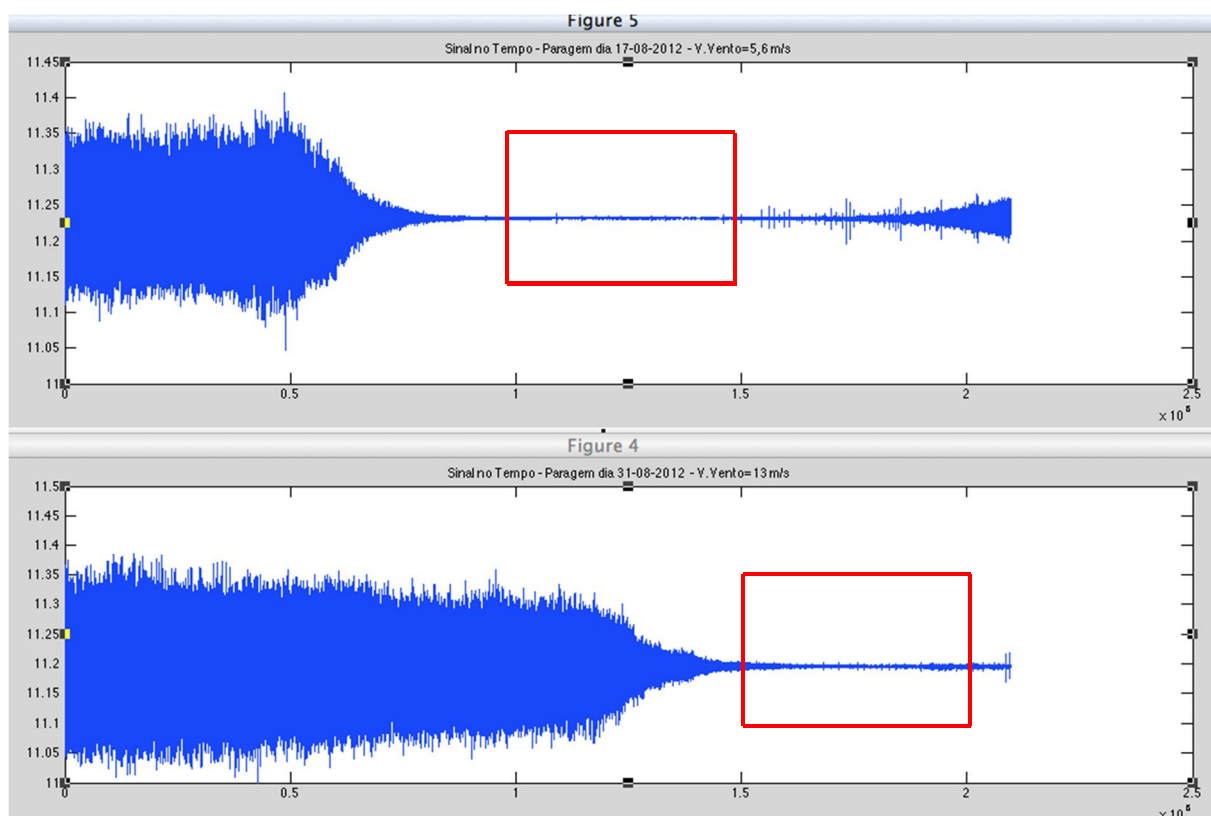


Figura 117 – Registo do sinal no tempo durante 81,92s – janela vermelha 20s após paragem

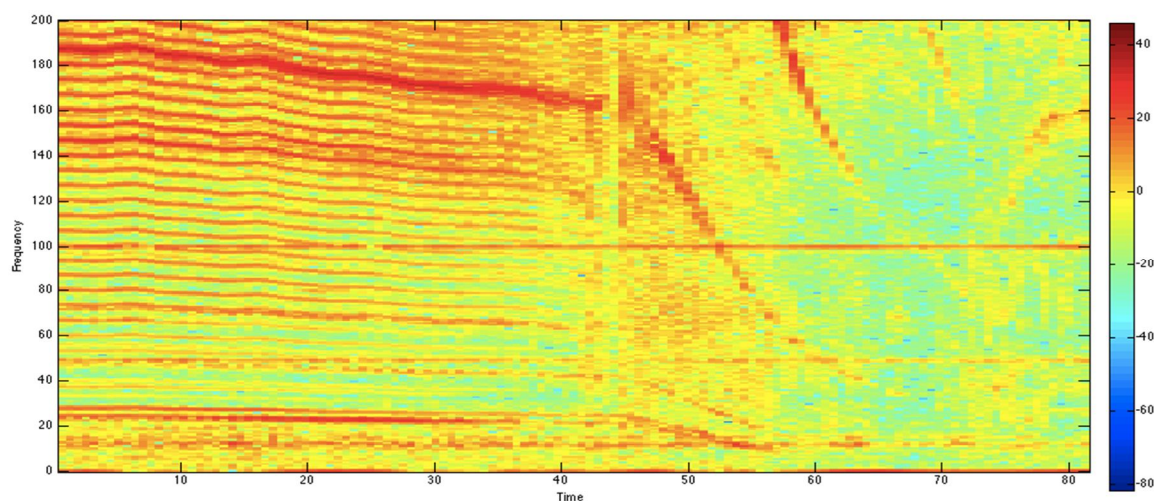


Figura 118 – Variação das componentes espectrais ao longo do tempo

5.6.1 Recolha e análise de dados da torre

No seguimento das recolhas efetuadas durante a paragem foram registadas várias frequências, sendo algumas delas identificadas como naturais.

No momento da paragem as recolhas de dados referentes à torre foram sincronizadas com as respostas dos acelerómetros colocados na caixa multiplicadora, para efeitos de comparação de respostas.¹⁷

Na figura 120 são apresentados os espectros das respostas do sensor colocado no estágio helicoidal (fig.119) sensor colocado na direção perpendicular ao veio, logo será considerada direção Y.

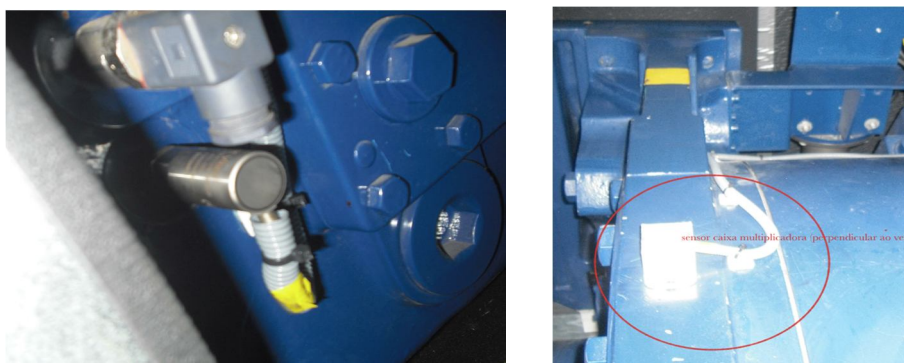


Figura 119 – Acelerómetros colocados na caixa multiplicadora - perpendicular em relação ao veio, direção y.

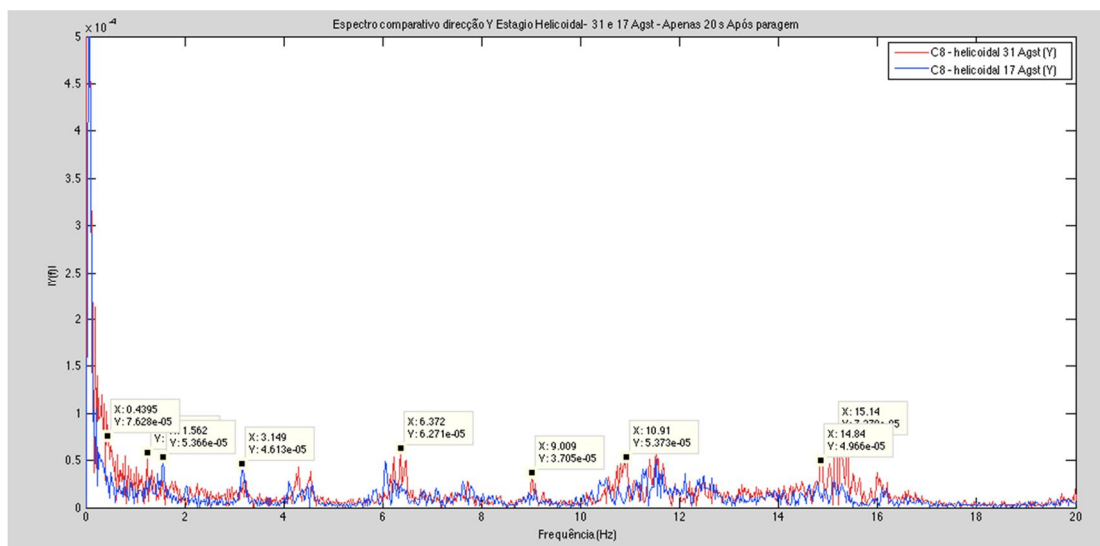


Figura 120 – Espectro comparativo direção Y estágio helicoidal 17 e 31 agosto

¹⁷ O canal 9 corresponde à caixa multiplicadora na direção x no alinhamento dos sensores da torre
O canal 8 corresponde à caixa multiplicadora na direção y no alinhamento dos sensores da torre

Na figura 121 são apresentados os espectros das respostas do sensor colocado no ponto mais alto da torre (3), na direção x, são comparadas as amplitudes de respostas no ponto 3 nos dias 17 e 31 agosto, com velocidades de vento 5 m/s e 13 m/s respetivamente.

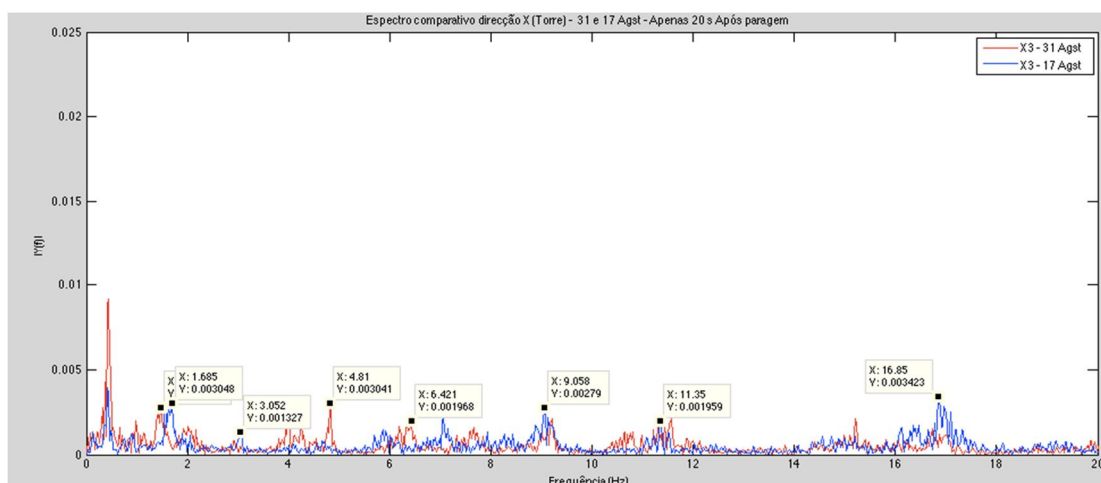


Figura 121 – Comparação das amplitudes de resposta do ponto x3 nos dias 17 e 31 Agosto

Na figura 122 são apresentados os espectros das respostas do sensor colocado no ponto mais alto da torre (3), na direção y, são comparadas as amplitudes de respostas no ponto 3 nos dias 17 e 31 agosto.

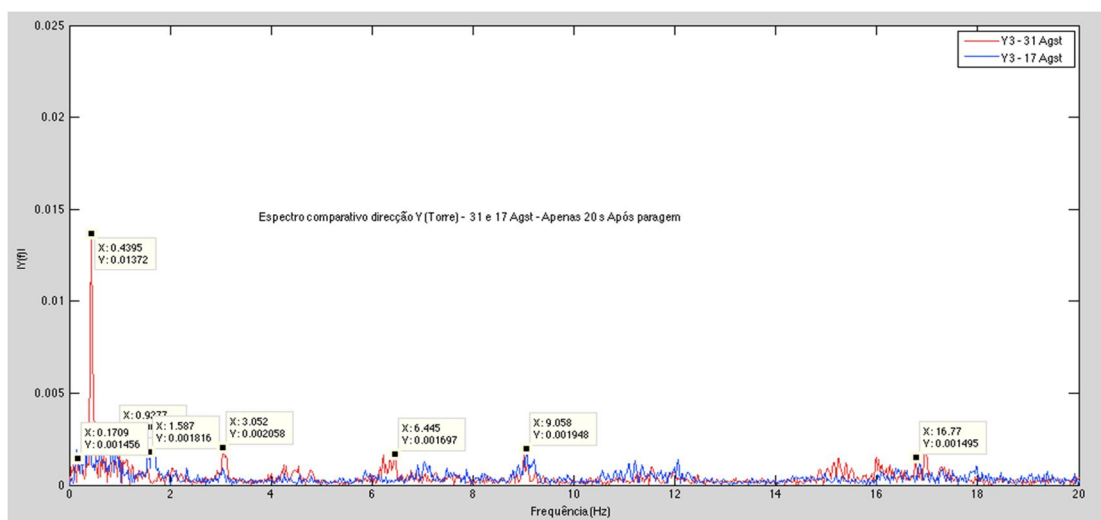


Figura 122 – Comparação das amplitudes de resposta do ponto Y3 nos dias 17 e 31 agosto

Constata-se que as amplitudes de resposta das primeiras frequências naturais na direção y são superiores a x. Como seria esperado as amplitudes para ventos superiores apresentam respostas superiores.

Através das figuras 123 e 124, observa-se que a amplitude da resposta dos acelerómetros dos canais 8 e 9 (helicoidal x e y) respetivamente, localizados na caixa multiplicadora, apresentam amplitudes muito baixas devido às características dos acelerómetros.[Anexo C.1]

Na comparação de respostas é possível observar que para a primeira frequência natural 0,43 Hz, esta apresenta maior amplitude na direção y, na segunda a 3 Hz a maior respostas é no ponto 2 direção x. Encontramos também amplitudes com alguma expressão a 4 Hz, 6 Hz, 9 Hz, 11Hz e 16 Hz. Estas na direção x apresentam maior amplitude no ponto mais alto (x3), quanto à direção y estas apresentam maior amplitude no ponto mais baixo (x1).

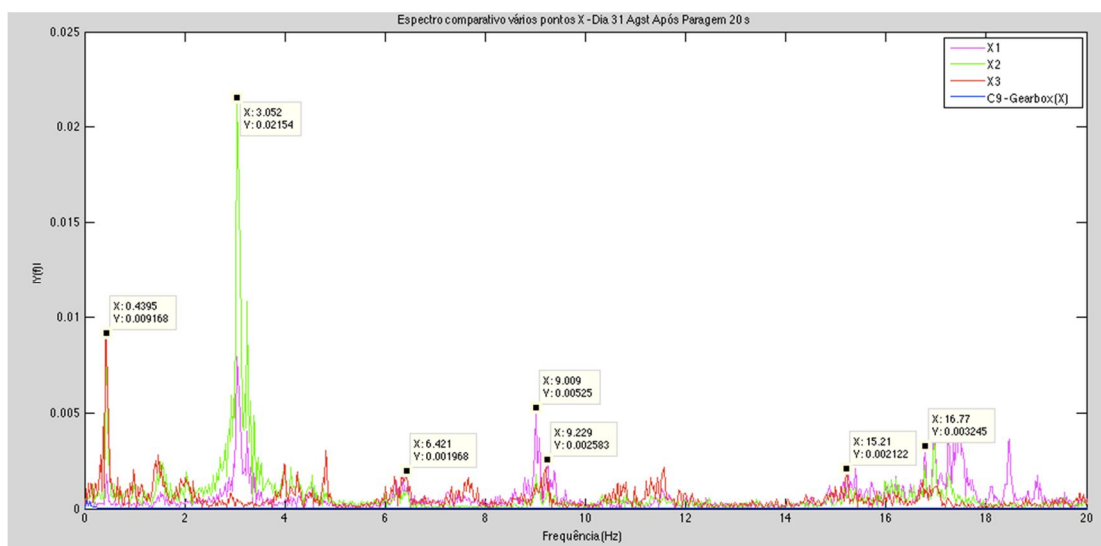


Figura 123 – Espectro de frequências após paragem na direção x

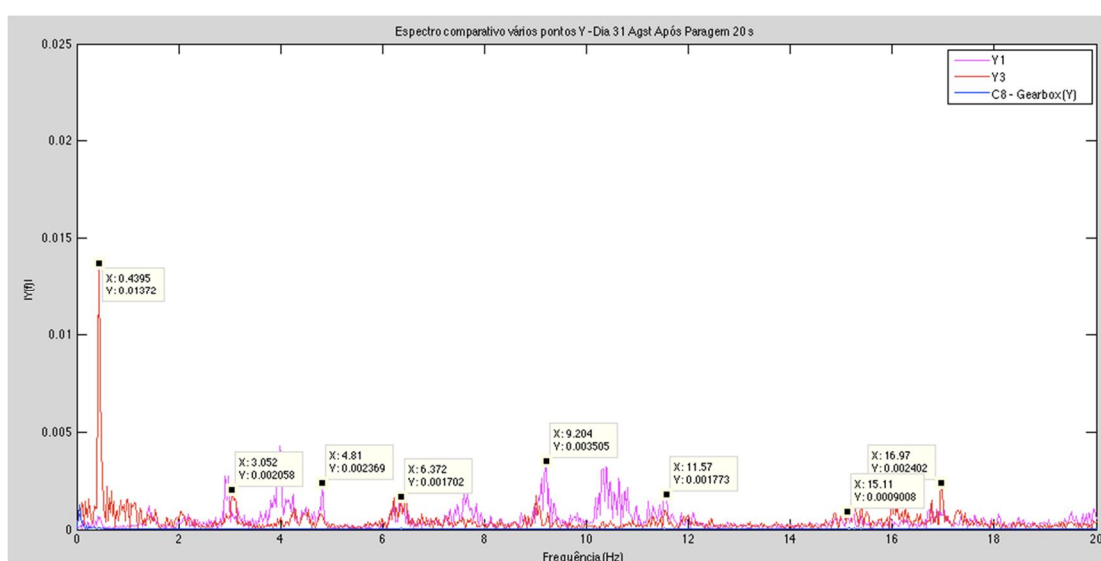


Figura 124 – Espectro de frequências após paragem na direção Y

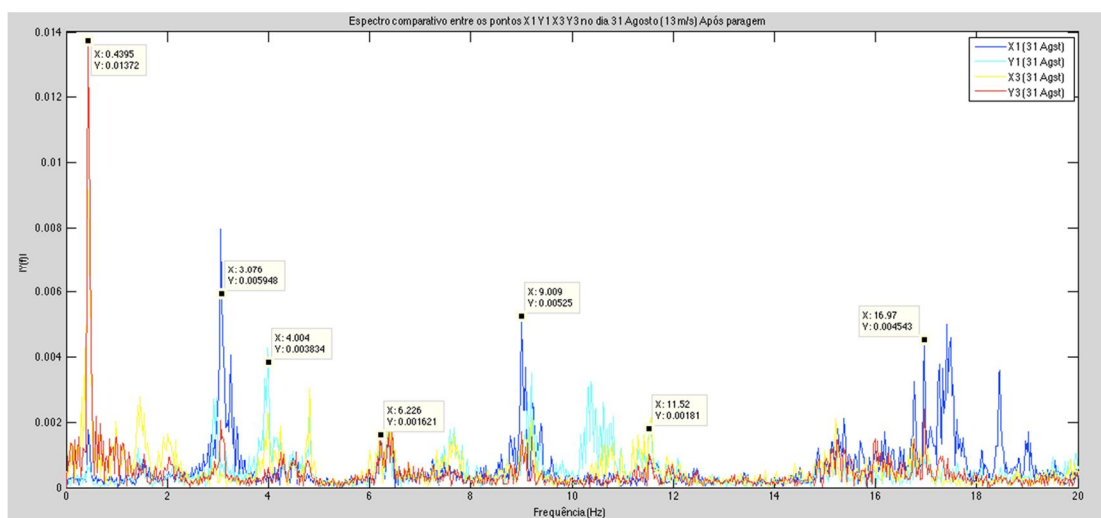


Figura 125 – Espectro comparativo entre as direções x e y nos pontos 1 e 3

5.6.2 Recolha e análise de dados da Nacelle

Durante o presente estudo foram recolhidas as acelerações na *nacelle*, para futura comparação com as respostas dinâmicas da torre, para tal foram instalados dois sensores de baixa frequência, mostrado na figura 126, sendo que a direção X pertence ao canal 10 e a direção Y ao canal 11.



Figura 126 – Instalação de sensores baixa frequência na nacelle - direções x e y

Nas figuras 127 e 128 foram comparados os dados provenientes da *nacelle* para as duas datas 17 e 31 de agosto, sendo que a linha vermelha representa o dia 31 de Agosto com velocidade de vento 13 m/s e a azul o dia 17 do mesmo mês com velocidade de vento de 5 m/s.

A resolução dos espectros mantêm-se nas baixas frequências (20Hz) visto que o objetivo do estudo centra-se na identificação das primeiras frequências naturais.

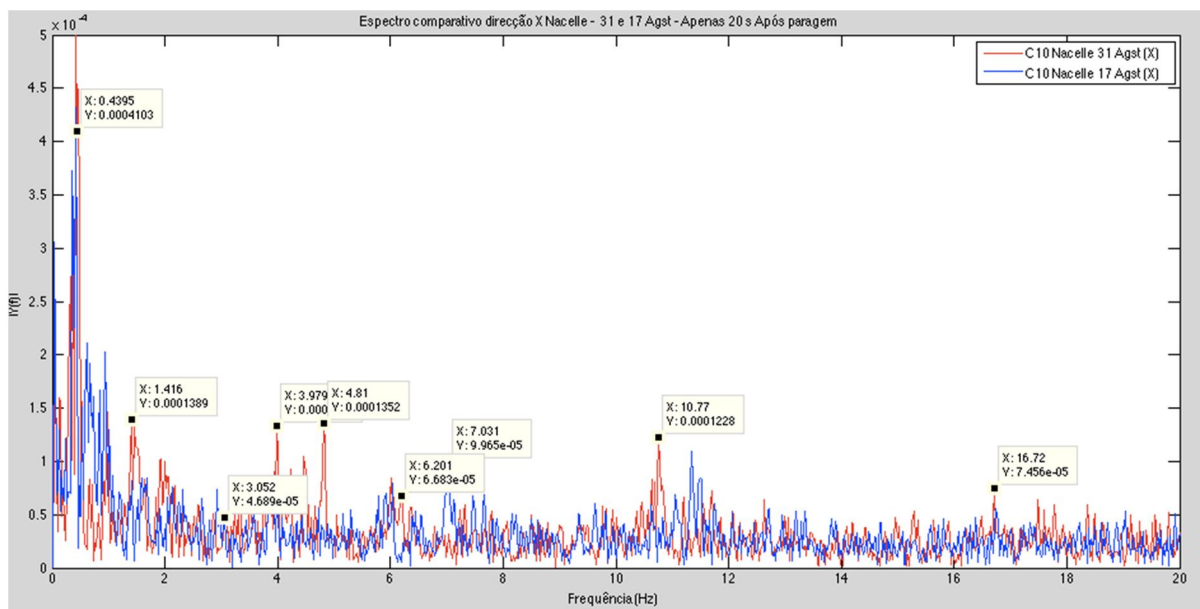


Figura 127 – Comparação das amplitudes na direção x (nacelle) velocidades de vento diferentes

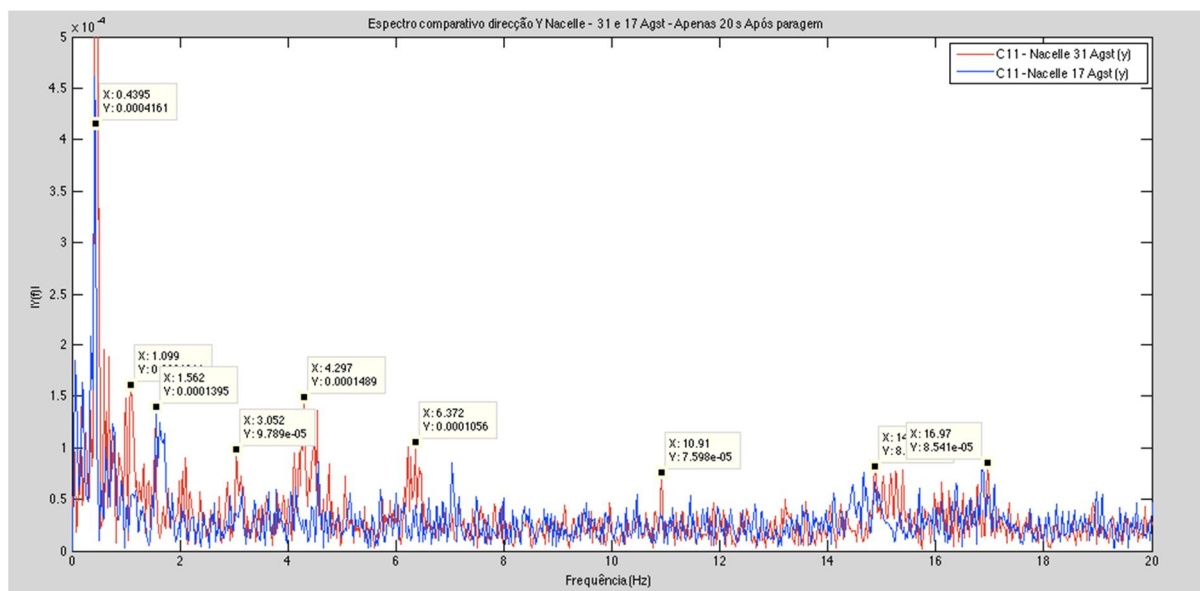


Figura 128 – Comparação das amplitudes na direção y (nacelle) velocidades de vento diferentes

Podemos observar que quando comparamos as amplitudes de resposta da *nacelle* na direção x e y com velocidades de vento diferentes (fig.127e 128), são realçadas as supostas frequências naturais.

Na figura 129 verificamos que para a mesma velocidade de vento (13m/s) as respostas nas duas direções são muito similares, apenas nas três primeiras supostas frequências naturais, a resposta é superior na direção y.

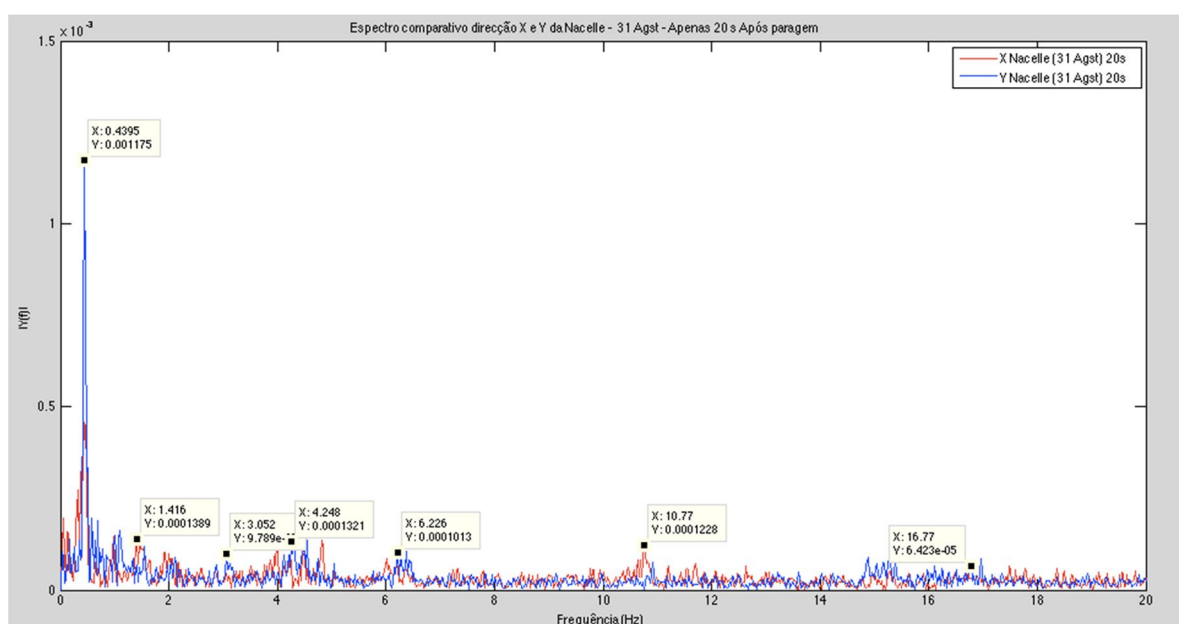


Figura 129 – Comparação das amplitudes na direção x e y para 13 m/s

5.7 – Análise de resultados

Para uma comparação real dos dados recolhidos respeitaram-se as direções iniciais, ou seja comparou-se o sensor x a 10,6 m, a 33 m, a 56,9 m, 64m (nacelle) e por último o sensor x colocado no veio de saída da caixa multiplicadora, o mesmo procedimento para o sensor y, apenas não foi possível registar as amplitudes em y2 devido a uma falha no sensor.

Para o estudo em questão observa-se que após a paragem de emergência, registaram-se as respostas da estrutura que tendem essencialmente para uma resposta marcada por frequências naturais:

1ª	0,43 Hz
2ª	1,5 Hz
3ª	3 Hz
4ª	4,8 Hz
5ª	6,3 Hz
6ª	9 Hz
7ª	11,5 Hz
8ª	16,8 Hz

Tab. 23 – Primeiras frequências da resposta da estrutura

Pensa-se estarem identificadas as primeiras frequências naturais da estrutura do aerogerador Vestas, localizado em Meroicinha (Tab. 23).

Na análise ao gráfico seguinte (fig. 130) é possível observar que as frequências obtidas na resposta da torre surgem no espectro obtido pelo fabricante de CMS (Bruel Kjaer), mas estas não correspondem aos dados cinemáticos dos componentes mecânicos calculados anteriormente, apenas se detetou a frequência de 12 Hz correspondente à frequência de defeito da gaiola do rolamento do veio de alta velocidade, permitindo validar a informação obtida nos espectros anteriores das supostas frequências naturais.

Como pode ser observado na figura 130 são marcadas a vermelho as frequências encontradas na resposta da torre.

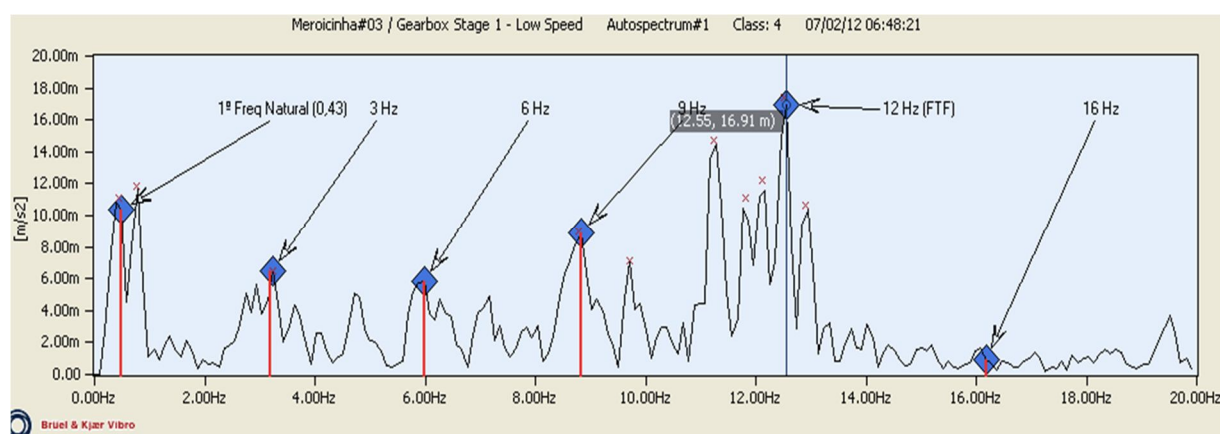


Figura 130 – Comparação das amplitudes na direção x e y para 13 m/s

Se compararmos as frequências obtidas através do ensaio com paragem de emergência, com as frequências obtidas pelo fabricante através de modelação em cálculo automático, que para o efeito admitiu as dimensões reais da torre, encastrada na base, com adição de massas concentradas correspondentes aos equipamentos instalados no topo da torre, é possível verificar que os valores das duas primeiras frequências estão bastante próximos.

Frequências naturais	Ensaio	Fabricante
1ª	0,43 Hz	0,37 Hz
2º	3 Hz	2,81 Hz
3º	9 Hz	8,27 Hz
4ª	16,8 Hz	16 Hz

Tab. 24 – Comparação das frequências de resposta do ensaio e do fabricante

Os ensaios realizados na torre permitiram afirmar que as primeiras frequências naturais não coincidem com a frequência de funcionamento, evitando assim ressonâncias indesejadas.

As vibrações geradas nos componentes mecânicos como caixa multiplicadora são sentidas com alguma expressão nos pontos mais altos da torre, já as vibrações da torre não afetam os componentes mecânicos mas alteram os resultados do cms, provocando falsos alarmes como foi mostrado na 1ª fase do trabalho experimental¹⁸, sendo o rolamento da chumaceira principal (sensor main, fig.16) o mais afetado, visto que a sua frequência de defeito aproxima-se de uma das frequências naturais (11,5 Hz). Também foi constatado que a resposta da torre altera o valor das amplitudes no espectro de frequências, contudo existiu um fenómeno na amplitude do 1º estágio de engrenamento, pois esta aumentou quando a velocidade do vento diminuiu.

Este será um ponto de futuro desenvolvimento e acompanhamento, visto que as parametrizações dos fabricantes de cms não contabilizaram a presença destas frequências.

É de extrema importância conhecer estas frequências, pois estas irão permitir relacionar e separar a informação obtida através do CMS.

O objetivo do presente trabalho centrou-se na avaliação dos sistemas de monitorização *on line* de vibrações mecânicas, estes parecem bastante fiáveis mas com necessidade de se ajustar os valores de alarme evitando assim substituições precoces de alguns componentes.

Foi possível observar que o comportamento da torre de suporte dos componentes mecânicos influencia a resposta do CMS, mesmo com velocidades de vento relativamente baixas.

No final da presente investigação conclui-se que, para uma maior fiabilidade dos dados seria oportuno integrar no sistema cms, a entrada de mais um canal com a resposta dinâmica da torre, sendo a melhor localização o ponto x3, desta forma seria possível correlacionar a informação obtida dos componentes mecânicos e estrutura.

¹⁸ Ver anexo A.2

Capítulo 6

Conclusões

6 – Conclusões

A presente dissertação contribui para uma evolução no que diz respeito ao diagnóstico de avarias mecânicas e estruturais, através do conhecimento das frequências de cada componente e da própria estrutura do aerogerador. Desta forma, será possível controlar a evolução dessas mesmas frequências, evitando falhas prematuras nos componentes mecânicos e estrutura, através da utilização desta informação como referência para planejar futuros trabalhos de manutenção. Só assim será possível otimizar a manutenção dos aerogeradores, evitando acidentes estruturais e perdas de produção de energia com o consequente aumento dos custos finais.

Verificou-se que as vibrações geradas nos componentes mecânicos, como a caixa multiplicadora e a chumaceira principal, são sentidas com alguma expressão nos pontos mais altos da torre; já as vibrações da torre parecem não afetar os componentes mecânicos, mas são suficientes para alterarem os resultados do CMS, provocando falsos alarmes nas baixas frequências. Nestes casos, o rolamento da chumaceira principal é o mais afetado, pelo facto de a sua frequência de defeito se aproximar de uma das frequências naturais (11,5 Hz). Constatou-se que, quando ocorrem velocidades de vento elevadas, a resposta da estrutura regista maiores amplitudes, influenciando, negativamente, os alarmes de CMS.

O objetivo do presente trabalho centrou-se em vários aspetos no controlo de condição de aerogeradores, sendo um deles a avaliação dos sistemas de monitorização *on line* de vibrações mecânicas, estes parecem bastante fiáveis, como se pode constatar no caso de estudo da Freita, mas necessita de ajustar os valores de alarme evitando assim substituições precoces de alguns componentes, verificado no parque eólico da Lousã.

Pelos motivos apresentados no parágrafo anterior compreende-se a necessidade de separar os capítulos do caso de estudo da Freita e Lousã, diretamente relacionados com alarmes provenientes do cms e o estudo do comportamento estrutural da torre do aerogerador.

Os ensaios realizados na torre permitiram concluir que as primeiras frequências naturais não coincidem com a frequência de funcionamento, evitando, assim, ressonâncias indesejadas. Contudo foi constatado que a resposta da torre altera o valor das amplitudes no espectro de frequências, principalmente no 1º estágio de engrenamento, verificou-se um aumento da sua amplitude quando a velocidade do vento diminuiu, quando se esperaria o contrário.

Os pontos 1 e 2 da torre são aqueles onde as baixas frequências apresentam maiores amplitudes.

Comparando os dados fornecidos pelo fabricante, através da modelação em cálculo automático, e os dados reais obtidos nos ensaios experimentais, verificou-se que os valores são bastante similares.

Conhecer estas frequências é um forte contributo para o conhecimento das respostas dinâmicas de um aerogerador novo, permitindo o acompanhamento da evolução das suas amplitudes ao longo da

sua vida útil. Por conseguinte, num futuro próximo, poderemos utilizar estes dados com o intuito de avaliar a integridade da estrutura.

Desde o início do presente estudo e até ao momento, não foram registadas avarias nos componentes mecânicos do aerogerador número três, localizado em Meroicinha, o que não permitiu conhecer essas frequências de defeitos na torre. Se, no futuro, ocorrer a situação contrária, poderá ser possível identificar a transmissibilidade das vibrações da *nacelle* para a torre e, assim, perceber-se qual será a melhor localização para a instalação de sensores nas torres de outros aerogeradores. Em princípio, tudo aponta para que seja a terceira plataforma localizada a 57 metros. Poderá ser introduzida uma nova entrada de dados (novo canal) no CMS que permita controlar as vibrações dos componentes mecânicos e torre ao mesmo tempo.

Através destas ferramentas, poder-se-á detetar a falha numa fase inicial, conhecer a sua origem e calcular o seu tempo de vida aproximado, através do histórico que foi criado ao longo destes três anos (curva de tendência).

O levantamento e o acompanhamento das avarias referentes aos componentes mecânicos permitiram a criação de um histórico com recurso ao registo de vibrações e da respetiva fotografia ao componente substituído, que constituiu um ponto de partida para a mudança de paradigma de manutenção em aerogeradores.

Uma contribuição importante desta mudança situa-se na alteração de procedimentos de manutenção, através do ajuste de alarmes de vibrações, evitando substituições de componentes que apresentem um nível de desgaste muito inicial. Foi proposto que, nos casos em que se verifiquem alarmes na caixa multiplicadora, deve realizar-se uma análise de óleo o mais cedo possível; se ocorrer nos rolamentos junto ao acoplamento, sugere-se a verificação do alinhamento.

Estas técnicas provaram ser extremamente fiáveis e bastante precisas na deteção de avarias. No entanto, constatou-se que devem ser acompanhadas por outras técnicas de monitorização, como sejam a análise de óleos, as endoscopias e termografia, para que se garanta uma maior fiabilidade dos dados. As desvantagens destas técnicas estão relacionadas, porém, com os seus custos, já que não têm tanta aplicação prática como seria de esperar, devido, justamente, ao seu custo elevado.

Verificámos que são inúmeros os parâmetros que influenciam o desgaste prematuro das engrenagens e que levam à substituição das caixas multiplicadoras ainda no seu início de vida; porém, foi notório que a monitorização das propriedades do lubrificante e a sua substituição no momento certo é um fator determinante para se prolongar a sua vida útil.

Verificou-se também que as amplitudes térmicas a que os aerogeradores estão sujeitos influenciam a degradação precoce dos lubrificantes, uma vez que, em Portugal, estamos sujeitos a grandes variações térmicas e os terrenos apresentam uma morfologia muito particular.

Sugere-se que, após o registo de muitas paragens de emergência do aerogerador, se proceda à análise de vibrações e, se necessário, conjugá-la com uma análise de óleos, com o intuito de preservar o bom funcionamento do mesmo.

No caso de estudo da Freita foi possível mostrar a funcionalidade e fiabilidade do sistema de monitorização do estado de condição (cms) dos componentes mecânicos, é um sistema a ser aplicado noutros aerogeradores. Atualmente já existem sistemas cms que integram contadores de

partículas nos filtros das caixas multiplicadoras, estes sem dúvida mais completos do que aqueles que estão instalados na Freita.

Na Lousã constatou-se que a falta de alinhamento entre a caixa multiplicadora e o gerador é o responsável pela substituição prematura dos rolamentos do gerador.

No aerogerador número três em Meroicinha apenas se estudou o comportamento estrutural, visto que durante a realização da presente tese não existiram falhas de componentes mecânicos.

Seria também de grande importância a criação de modelos de manutenção condicionada aplicada a aerogeradores, gráficos de alerta, onde se pudesse visualizar a evolução de certos parâmetros por aerogerador, tais como valores de vibrações, análise de óleos e até mesmo amplitudes térmicas.

No final do presente estudo, gostaríamos de realçar a importância que esta ferramenta “análise de vibrações” teve na aplicação da manutenção condicionada, não descurando também a utilização de novos materiais, incluindo lubrificantes e componentes mecânicos, como, por exemplo, a utilização de rolamentos de esferas cerâmicas.

Sugestões para trabalhos futuros

Os aspetos atrás referidos foram, portanto, algumas das conclusões onde aportámos com a realização deste nosso trabalho de investigação. Acreditamos, porém, que a temática não se encontra esgotada e, nesse sentido, gostaríamos de fazer algumas sugestões.

Em primeiro lugar, recomendamos uma continuação do trabalho experimental que permita estudar de forma mais elaborada a transmissibilidade das vibrações após avarias mecânicas para a torre, com o objetivo de se conhecer qual será a melhor localização para a instalação de sensores nas torres de outros aerogeradores.

Em segundo, defendemos a importância de se redefinir os alarmes de vibrações de acordo com as condições de funcionamento particulares de cada aerogerador.

Em terceiro, e pensando no controlo de condição à distância, gostaríamos de chamar a atenção para a existência de sensores *wireless*, que poderiam ser utilizados nas pás, correlacionando essas respostas com as do CMS.

Em quarto, sugerimos que se procure minimizar as vibrações sentidas na torre através de um controlo estrutural, com base na alteração de propriedades de rigidez e de amortecimento.

Em último lugar, não poderíamos deixar de sublinhar a importância de se conhecer as frequências naturais, pois permite garantir a manutenção futura da estrutura ou melhorar pontos fracos, contribuindo para o desenvolvimento de torres eólicas com recurso à utilização de novos materiais de elevada resistência que apresentem um melhor desempenho estrutural.

Capítulo 7

Bibliografia

7 - Bibliografia

- [1] DGED, site: www.dgeg.pt/, consultado em 12 Janeiro 2013.
- [2] McNiff, B. (1990), "Variations in Gear Fatigue Life for Different Wind Turbine Braking Strategies", Golden, CO: Solar Energy Research Institute.
- [3] Bir, G.S; Oyaque, F. (2007) "Estimation of Blade and Tower Properties for the Gearbox Research Collaborative Wind Turbine", NREL TP-500-42250, Golden, Colorado: National Renewable Energy Laboratory.
- [4] Tavner, P. (2011), "Reliability & Availability of Wind Turbine Electrical & Electronic", acedido em Dezembro 2011, http://www.reliawind.eu/files/publications/pdf_13.pdf
- [5] Sheng, S.; Link, H.; LaCava, W.; Van Dam, J.; McNiff, B.; Veers, P.; Keller, J.; Oyague, F.; Butterfield, S. (2011) "Wind Turbine Drivetrain Condition Monitoring During GRC Phase 1 and Phase 2 Testing" NREL TP-5000-52748, Golden, Colorado: National Renewable Energy Laboratory.
- [6] Basaraba, B.; Archer, J. (1999) "IPT's Rotating equipment handbook machinery reliability & condition monitoring", Quebecor jasper, Canada. ISBN 0-920855-26-1. pp.73 – 91.
- [7] Berry, James E. (1994) "Vibration Analysis III". Milford, USA, Vol 1, Entek IRD, pp.2-1 – 2-46.
- [8] Berry, James E. (1994) "Vibration Analysis III". Milford, USA, Vol 2, Entek IRD, pp.7-1 – 11-7.
- [9] International Energy Agency. Relatórios técnicos - key world energy statistics, 2011. Disponível em <http://www.iea.org> e <http://www.ieawind.org>, acedido em Agosto de 2011.
- [10] Oyague, F. (2009) "Gearbox Modeling and Load Simulation of a Baseline 750-kW Wind Turbine Using State-of-the-Art Simulation Codes" NREL Report No. TP-500-41160. Golden, CO: NREL.
- [11] Verbruggen, T. W. (2003) "Wind turbine operation & maintenance based on condition monitoring". Relatório técnico, ECN Project Number: ECN-C-03-047.
- [12] Hameed, Z.; Hong, Y.S.; Cho, Y.M.; Ahn, S.H.; Song, C.K. (2009), "Condition monitoring and fault detection of wind turbines and related algorithms: A review", Elsevier Science Direct.
- [13] Link, L.; LaCava, W.; van Dam, Jeroen.; McNiff, B.; Sheng, S.; Wallen, R.; McDade, M.; Lambert, S.; Butterfield, S.; Oyague, Francisco. (2011) "Gearbox Reliability Collaborative Project Report: Findings from Phase 1 and Phase 2 Testing". NREL Report No. TP-5000-51885. Golden, CO: NREL.

- [14] Hameed Z, Ahn SH, Cho YM. "Practical aspects of a condition monitoring system for a wind turbine with emphasis on its design, system architecture, testing and installation". Renewable Energy 2010.
- [15] Molinari, M.; Pozzi, M.; Zonta, D.; Battisti, L. (2010) "In-field testing of a steel wind turbine tower". IMAC-XXVIII, Jacksonville, Florida USA.
- [16] Osgood, R.; Bir, G.; Mutha, H.; Peeters, B.; Luczak, M.; Sablon, Gert. (2010) "Full-scale modal wind turbine tests: comparing shaker excitation with wind excitation". IMAC-XXVIII, Jacksonville, Florida USA.
- [17] Bir, G.; Jonkman, J. (2008) "Modal dynamics of large wind turbines with different support structures", ASME 27th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Estoril, Portugal, pp.13-20.
- [18] Paulsen, U. S.; Schmidt, T.; Erne, O. (2010) "Developments in Large Wind Turbine Modal Analysis Using Point Tracking Videogrammetry" IMAC-XXVIII, Jacksonville, Florida USA.
- [19] Li, S. (2002) "Gear contact model and loaded tooth contact analysis of a threedimensional, thin rimmed gear". Journal of Mechanical Design, 124 (3) pp: 510 – 527.
- [20] Board, D. (2008) "Stress Wave Analysis Provides Early Detection of Lubrication Problems", <http://www.machinerylubrication.com/Read/501/stress-wave-analysis>
- [21] Drewry, M. A.; Georgiou, G. A. (2006) "A review of NDT techniques for wind turbines", acedido em: www.ndt.net/search/docs.php3?id=4550, Baseado na apresentação NDT 2006, Annual British Conference on NDT, Stratford-upon-Avon, UK.
- [22] Rodrigues, R. B. (2010) "Protecção de Sistemas de Energia Eólica contra descargas eléctricas atmosféricas" Tese para a obtenção do grau de Doutor, Universidade da Beira Interior.
- [23] Manwell J.; McGowan, J; Rogers, A. (2009), "Wind Energy Explained", Teory, Design and Application, 2^ª edition, Wiley, Great Britain, ISBN 978-0-470-01500.
- [24] Castro, R. (2004), "Introdução à Energia Eólica", Instituto Superior Técnico.
- [25] Vestas, site: <http://www.vestas.com>.
- [26] Marquez, A. ; Sobin, A.; Park3, G. ; Farinholt, K. (2010) "Structural Damage Identification in Wind Turbine Blades Using Piezoelectric Active Sensing", Proceedings of the IMAC-XXVIII, Jacksonville, Florida USA.
- [27] Crawford, Arthur R. (1992), "The simplified handbook of vibration analysis", Vol 1, CSI.
- [28] CMS, condition monitoring system, Bruel, <https://data.bkvibro.com>
- [29] López, P.(1999), "Vibraciones mecánicas diagnósticos de averías. Universidade da Coruña, ISBN 84- 95322-11-0.
- [30] Collacott, Ralph A. – "Vibration monitoring and diagnosis". Leicestershire, 1978. ISBN. pp. 11–222.
- [31] Vestas, (2010), " Projeto de construção de fundações do parque eólico de vila do Bispo", Zaragoza.
- [32] Uys, P. ; Farkas, J.; Jarmai, K.; Vantonder, F. (2007), " Optimisation of a steel tower for a wind turbine structure", Engineering Structures, Entek IRD.
- [33] Campos A. (1994), "Determinação da geometria do filme lubrificante, da distribuição da

- pressão e das tensões de corte num contacto Elastohidrodinâmico. Aplicação a rolamentos de rolos”, Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do porto.
- [34] Castanhola, B. (1997), “Deterioração por Fadiga de Contacto de Engrenagens Tratadas Superficialmente”, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.
 - [35] Stress Wave Analysis Provides Early Detection of Lubrication Problems, acedido Junho 2011 <http://www.machinerylubrication.com/Read/501/stress-wave-analysis>
 - [36] SKF (2009), Catálogo geral, edição para estudantes.
 - [37] Xu, M. (1995), “Spike Energy and its Applications”, Mechanalysis, Inc Columbus, OH-USA.
 - [38] Taylor, James I. (2000) “The gear analysis handbook, a practical guide for solving vibration problems in gears”, Vibration consultants, inc. 1ª Ed, Florida, ISBN: 0-9640517-1-0. pp. 5 – 20.
 - [39] Randall, R.B. ; Tech, B.A (2007), “Frequency Analysis”, Brüel & Kjaer, ISBN 87- 87355-07-8. pp. 37-76.
 - [40] Wenxian, Y.; Tavner, P. (2008), “Research on a Simple, Cheap but Globally Effective Condition Monitoring Technique for Wind Turbines” acedido em Dezembro 2010, http://www.reliawind.eu/files/publications/pdf_07.pdf
 - [41] Errichello, R.L., (1990) “Lubrication of Gears , Lubrication Engineering”, Vol. 46, Cap.1-4.
 - [42] Seireg, A.A. – Friction and Lubrification in Mechanical Design. Marcel Dekkers, New York, 1998. ISBN 0-8247-9974-7. pp. 310 – 338.
 - [43] Stachowiak, G.; Batchelor, A. (1993), “Engineering Tribology”, “cap 12 - Adhesion an Adhesive Wear”, Tribology Series, 24, Elsevier.
 - [44] Hamrock, J.,(1994) “Fundamentals of Fluid Film Lubrication”, McGraw-Hill.
 - [45] Rolamentos, acedido em setembro (2011), www.skf.com.
 - [46] Maedel, P.H.(1996), “Vibration Standards and Test Codes”, Shock and Vibration Handbook, 4th edition, C.M. Harris, ed, McGraw-Hill, NY (1996).
 - [47] He, J., (1987), “Identification of Structural Dynamics Characteristics”, PhD Thesis, Imperial College of Science, Technology and Medicine, University of London, England.
 - [48] G.S. Bir.; F. Oyague (2007) “Estimation of Blade and Tower Properties for the Gearbox Research Collaborative Wind Turbine” NREL/TP-500-42250 Technical Report.
 - [49] ISO, 81400-4, (2005), “Design and specification of gearboxes”, in Wind Turbines.
 - [50] RAO, Singiresus. “Mechanical vibrations”, 3ª ed. Addison – Wesley publishing company, 1995. ISBN 0-201-52686-7
 - [51] TAYLOR, James I. – **The vibration analysis handbook, a practical guide for solving rotating machinery problems**. Vibration consultants, inc. 1ª Ed, Florida, 2000. ISBN 0-9640517-0-2. pp. 119 – 222.
 - [52] Matlab, Software, <http://www.mathworks.com/products/matlab/>.
 - [53] Vestas, (2007), “ Projecto de Execução “, Parque Eólico da Meroicinha, Terras de Bouro, Vila

Real.

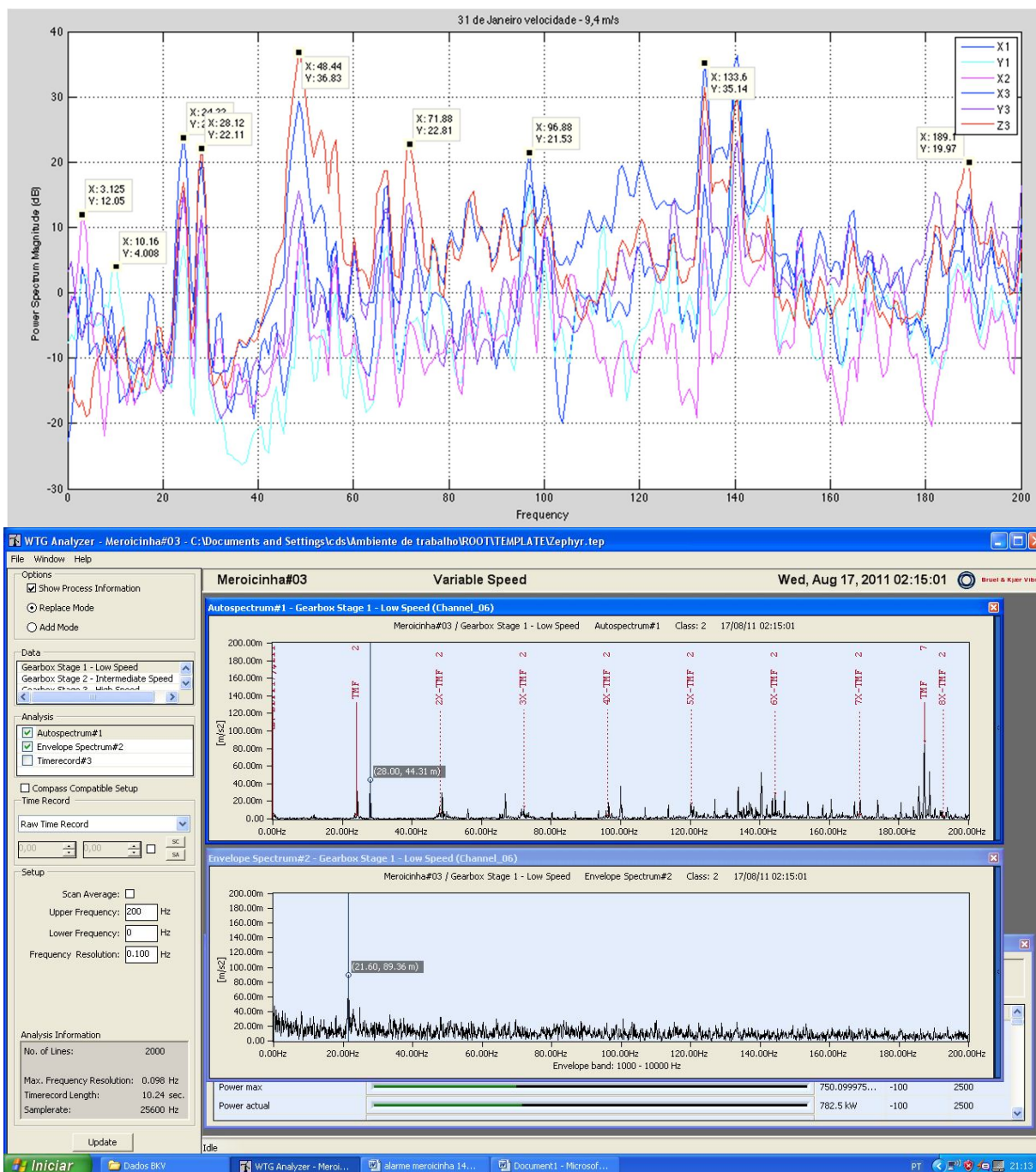
- [54] Associação de energias renováveis, acedido Fevereiro 2012, <http://www.apren.pt>
- [55] Azevedo, J.; Guerreiro, L. (2007). "Current Status of Seismic Isolation and Energy Dissipation and Applications for Buildings, Bridges and Viaducts, in Portugal". 10th World Conference on Seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Vibrations Control of Structures.
- [56] WOW, Victor – **Machinery vibration, measurement and analysis**. McGraw-Hill, USA, 1991. ISBN 0-07-071936-5. pp. 59 – 148.
- [57] Conditioning monitoring for win turbines, acedido em março de 2009, <http://www.upwind.eu/pdf/D7.1.1.%20Condition%20monitoring%20for%20wind%20turbines.pdf>
- [58] Dai, J.; Hu, Y.; Liu, D.; Long, X. (2011), "Aerodynamic loads calculation and analysis for large scale wind turbine based on combining BEM modified theory with dynamic stall model", Renewable Energy, v. 36.
- [59] Dally, J.; Riley, W.; Mcconnel, K. (1999), "Instrumentation for engineering measurements. 2ªed, pp.356 – 407.
- [60] Dellezzopolles, C. (2011), "Análise Dinâmica de torres de Energia eólica", Tese mestrado em estruturas e construção civil, Universidade de Brasília, Brasil.
- [61] Direção geral de energia, acedido em outubro de 2009, <http://www.dge.pt/>
- [62] DWIA. Danish Wind Industry Association -DWIA. Estatísticas anuais, (2011), acedido em 12 Setembro, <http://www.windpower.org/en/knowledge/publications.html>.
- [63] Energias Renováveis, acedido em Outubro de 2011, <http://www.portal-energia.com/protocolo-de-quioto/>
- [64] EWEA, "European Wind Energy Association", Wind Energy Factsheets 2011, acedido em outubro, 2011, <http://www.ewea.org/>.
- [65] E.ON UK. (2005) "Capital grant scheme for offshore wind annual report", acedido em setembro 2010, <http://www.berr.gov.uk/files/file34791.pdf>.
- [66] Flender, acedido em Outubro (2010), "Condition monitoring now certified for wind power plants", http://www.ludeca.com/casestudy/Telediagnose/TD05_en.pdf.
http://www.flender.com/content_manager/page.php?ID=6025950&dbc=8e9e8561da475b56735c4a71416c6e28
- [67] Gamesa, acedido em fevereiro de 2010.
<http://www.ewea.org/> <http://www.gamesa.es/gamesa/index.html> <http://www.iapmei.pt/iapmei-art-03.php?id=1321> <http://www.iapmei.pt/iapmei-leg-03.php?lei=2686> <http://www.ieawind.org/>
- [68] Gipe, P. (2004), "Renewable Energy for Home, Farm, and Business", Wind Power, Revised Edition, ISBN: 978-1-931498-14-2.
- [69] GWEC, "Global Wind Energy Council", Global Wind 2009 Report, acedido em Abril 2010, <http://www.gwec.net/>.
- [70] Lacalle, R.; Cicero, S.; Álvarez, J. (2011), "On the analysis of the causes of cracking in a wind tower", Engineering Failure Analysis.
- [71] Iov, F.; Hansen, A.; Cutululis, N.; Sørensen, P., (2007) "A survey of interconnection requirements for wind power", Proc. Nordic Wind Power Conference (NWPC), Roskilde, Denmark.

-
- [72] ISO. Mechanical vibrations, evaluation of machine vibration, International Standard. ISO 10816-1.
- [73] Kessenti, S.; Choura, S.; Najjar, F.; Franchek, M. (2010), "Modeling and Dynamics of a Horizontal Axis Wind Turbine. Journal of Vibration and Control, acessado em Dezembro 2010, <http://jvc.sagepub.com/content/early/2010/04/22/1077546309350189>.
- [74] Maedel, P.H. (1996), "Vibration Standards and Test Codes, Shock and Vibration Handbook", 4th edition, C.M. Harris, ed, McGraw-Hill, NY.
- [75] Moventas, acessado em set (2010), <http://www.moventas.com>
- [76] Muller, J.R (1993) "The Lubrication of Wind Turbine Gearboxes", Lubrication Engineering, Vol. 49, No. 11, pp. 839-843.
- [77] Nordex, <http://www.nordex.com>.
- [78] REN, Rede elétrica nacional, <http://www.ren.pt/sections/publicacoes/Mibel/default.asp>
- [79] Rodrigues, J. (2004), "Identificação Modal Estocástica, Métodos de Análise e Aplicações em Estruturas de Engenharia Civil ", Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- [80] Siemens Power Generation, (2010) online: <http://www.powergeneration.siemens.com>
- [81] Sirqueira, A.(2008) "Comportamento Estrutural de Torres de Aço para Suporte de Turbinas Eólicas", Tese apresentada à Universidade do Estado do Rio de Janeiro para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil, Rio de Janeiro.
- [82] SimPack, <http://www.simpack.com/websitep.html>.
- [83] Sheng, S.; Link, H.; LaCava, W.; Van Dam, J.; McNiff, B.; Veers, P.; Keller, J. (2011), "Wind Turbine Drivetrain Condition Monitoring During GRC Phase 1 and Phase 2"). NREL/TP-500-52748, Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory.

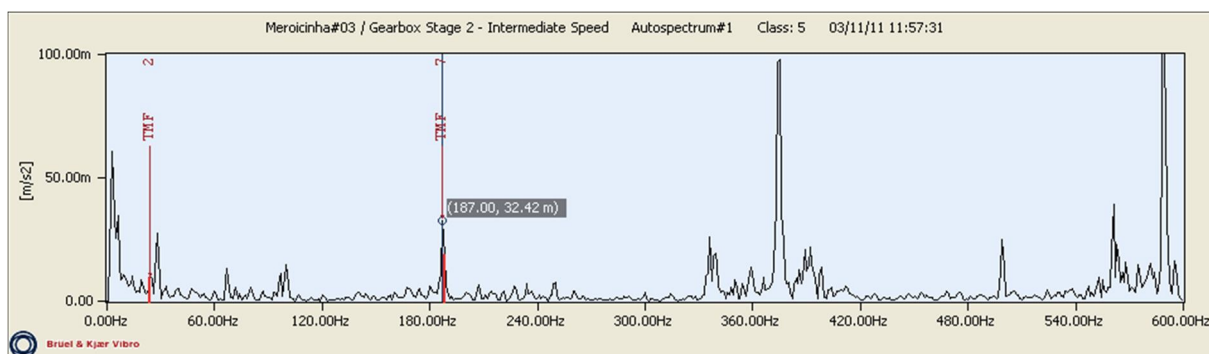
Anexos

Anexo A

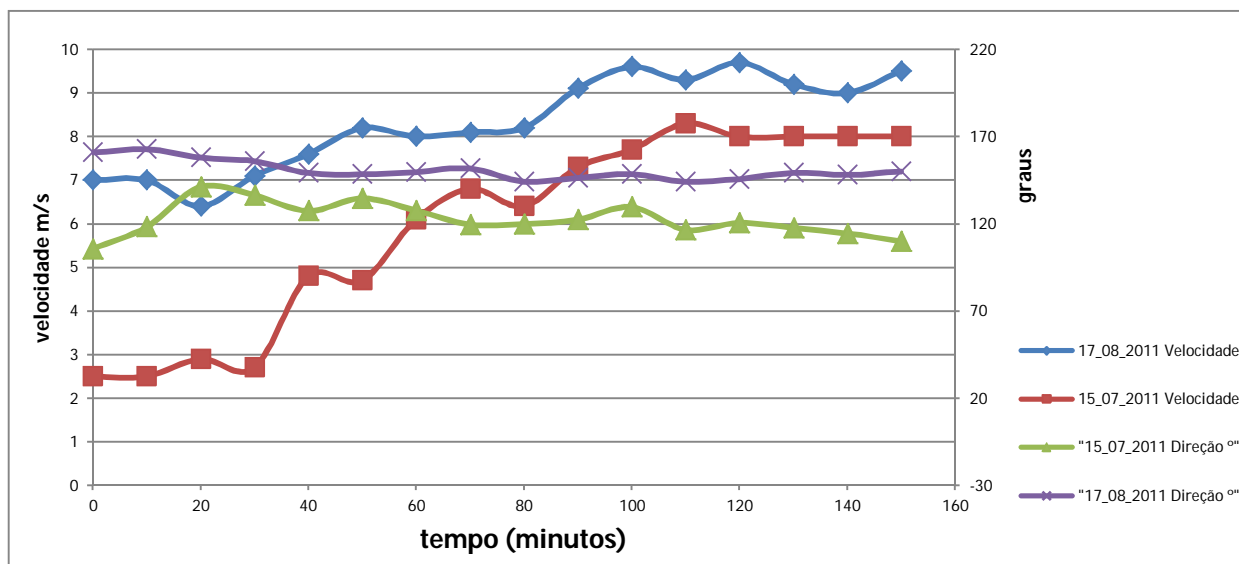
A.1 – Gráficos comparativos dos vários pontos 1,2 e 3 na torre e CMS com velocidade de vento igual de 9,4 m/s.



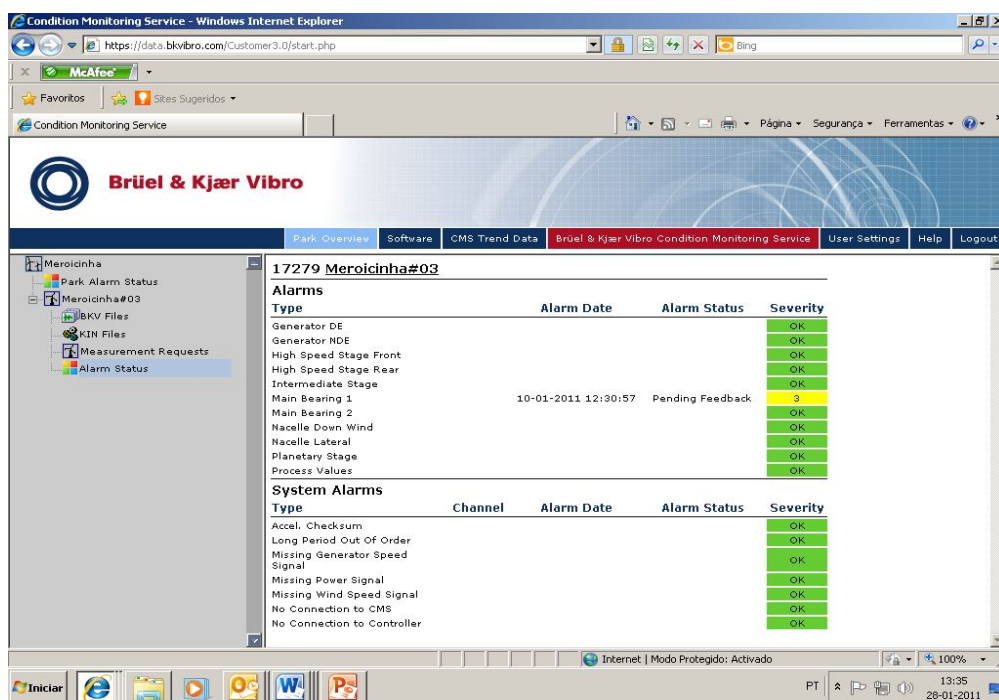
A.2 – Espectro comparativos das amplitudes no CMS com velocidade de vento igual a 15,5 m/s



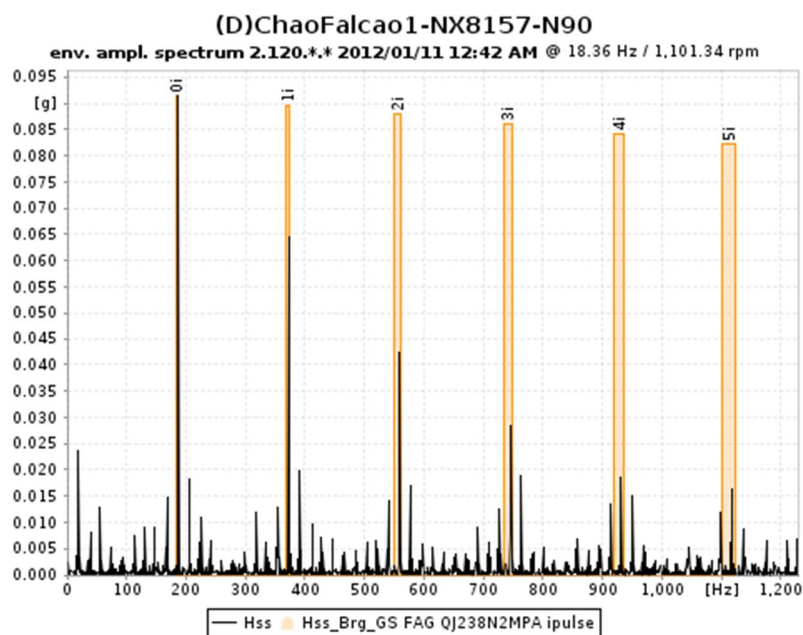
A.3 – Registo da velocidade do vento e da direção nas datas 15 de julho e 17 de agosto de 2011



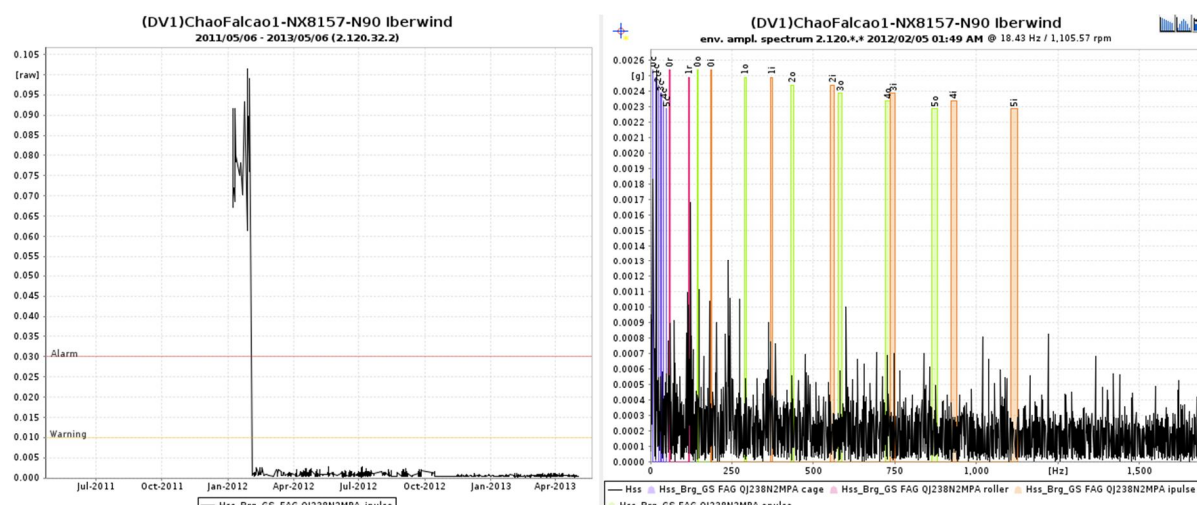
A.4 – Alarme CMS proveniente da chumaceira principal



A.5 – Espectro envelope no rolamento do veio de alta velocidade (HSS) após alarme



A.5.1 – Espectro envelope veio de alta velocidade (HSS) após substituição do rolamento no veio de alta velocidade



A.6 – Tabela de registo das maiores amplitudes identificadas na torre, 30-07-2011 (10 m/s)

	Torre	Amplit
	Hz	dB
TMF - 1º EST		
x1	24	15,8
Y1	24	7
X2	24	3
X3	24	22,43
Y3	24	15,8
Z3	24	15,8
Rotor speed		
x1	27,3	12
Y1	27,3	12
X2	27,3	4,2
X3	27,3	19,18
Y3	27,3	12
Z3	27,3	21,68
2XTMF - 1ºEST		
x1	47,1	6
Y1	47,1	13
X2	47,1	8
X3	47,1	27,2
Y3	47,1	22
Z3	47,1	31,8
6XFTF		
x1	65	1,4
Y1	65	13
X2	65	-2,7
X3	65	1,4
Y3	65	9
Z3	65	13
3XTMF		
x1	70	-3,8
Y1	70	-3,8
X2	70	0
X3	70	10
Y3	70	10
Z3	70	22
Freq. Rede		
x1	100	-8
Y1	100	-16
X2	100	-8
X3	100	23
Y3	100	18
Z3	100	12
5XRotor Speed		
x1	136	3
Y1	136	3
X2	136	0
X3	136	12
Y3	136	12
Z3	136	12

Anexo B**B.1 – Tabela com registo da velocidade do vento, direções e potência da Meroicinha**

PCTimeStamp	WTG03_Ambient WindSpeed Avg. (1)	WTG03_Ambient WindDir Absolute Avg. (2)	WTG03_Ambient Temp. Avg. (3)	WTG03_Grid Production Power Avg. (4)
01-07-2011	7,1	313,5	21	322,1
01-07-2011 00:10	7,1	309,9	21	312,4
01-07-2011 00:20	6,8	305,1	21	276,3
01-07-2011 00:30	6,2	305,6	21	211,5
01-07-2011 00:40	6	308,4	21	186,3
01-07-2011 00:50	6,2	308,7	21	199,7
01-07-2011 01:00	6,7	306,7	21	257
01-07-2011 01:10	7,4	303,6	20	372,8
01-07-2011 01:20	7,9	296	19	468
01-07-2011 01:30	7,7	293,2	19	398
01-07-2011 01:40	7,9	297,6	19	465,8
01-07-2011 01:50	8	302	18	479
01-07-2011 02:00	7,6	303,8	18	413,8
01-07-2011 02:10	8,2	309,2	17	494,5
01-07-2011 02:20	7,9	310,2	17	448,2
01-07-2011 02:30	7,6	308,9	17	400,9
01-07-2011 02:40	8,3	304,7	16	505,6
01-07-2011 02:50	8,6	310,8	16	603
01-07-2011 03:00	8,7	309,1	16	629,2
01-07-2011 03:10	8,4	307,4	16	556,8
01-07-2011 03:20	8,5	308,2	16	600,1
01-07-2011 03:30	8,5	309,1	15	587,3
01-07-2011 08:30	8,4	323,8	17	635
01-07-2011 B.1	7,6	325,9	17	467,8

B.2 – Tabela com interligação dos dados com velocidades de vento semelhantes

BKV	velocidade do vento	RAW DATA
15/7/2011 (13:48) 0,39	13:40 = 8,4 m/s 12:50 = 8,6 m/s	12:14 = 6,5 m/s = 200 kW
30/7/2011 (15:24) 0,39	15:20 = 10 m/s 15:30 = 10,3 m/s	15:19 = 10 m/s → igual = 935 kW
6/8/2011 (21:57) 0,39	21:50 = 8,5 m/s 22:00 = 8,6 m/s	22:48 = 7,8 m/s = 460 kW
17/8/2011 (02:15) 0,39	02:15 = 9,2 m/s	11:31 = 6,5 m/s = 200 kW
24/8/2011 (16:37) 0,69	16:40 = 6,5 m/s = 235 kW	00:54 = 6,3 m/s = 192 kW
9/9/2011 (14:30) 0,68	14:30 = 7,7 m/s = 447,4 kW	14:49 = 7,2 m/s = 360 kW → (fazer)
3/11/2011 (11:57) 0,55	11:50 = 15,3 m/s 12:00 = 13,3 m/s	13:30 = 17 m/s = 1970 kW → (fazer)
11/11/2011 (03:52) 0,39	03:52 = 9 m/s	03:10 = 10,9 m/s = 1292 kW
18/11/2011 (17:14) 0,69	17:10 = 8,2 m/s 17:20 = 8,3 m/s	10:38 = 7,8 m/s = 430 kW → (fazer)
15/1/2012 (9:59) 1,1	10:00 = 11,7 m/s	19:30 = 8 m/s = 636 kW
23/1/2012 (11:45) 0,39	11:45 = 9,3 m/s	18:57 = 8,7 m/s = 694 kW → (fazer)
31/1/2012 (01:17) 0,39	01:10 = 8,8 m/s ≈ 9 m/s	00:40 = 9,4 m/s = 841 kW
7/2/2012 (06:48) 0,39	06:45 = 18,5 m/s	08:59 = 18,2 m/s = 1708,3 kW
14/2/2012 (16:06) 1,18	16:00 = 10,5 m/s	11:18 = 11 m/s = 1367 kW → (fazer)
23/2/2012 (06:08) 0,39	06:10 = 7,9 m/s	→ não temos recepção
1/3/2012 (16:35) 0,39	16:30 = 4,2 m/s 16:40 = 3,9 m/s 4,05 m/s	10:37 = 5 m/s = 80 kW

no BKV de 10,8 m/s

B.3 – Tabela de acesso aos dados da torre – vibrações UFF

Índice de ftp://62.28.183.253/RawData/

Para um directório de nível superior

Nome	Tamanho	Última modificação
DT-Stoptest-17279-20120815-1628-120815-1434.zip	54809 KB	12/08/22 09:02:00
DT-Stoptest-17279-20120816-0824-120816-0630.zip	54127 KB	12/08/22 09:02:00
DT-Stoptest-17279-20120817-1507-120817-1313.zip	36416 KB	12/08/17 16:54:00
DT-Stoptest-17279-20120831-1229-120831-1035.zip	43840 KB	12/08/31 13:22:00
HUM-17279-CWF-110714-0001-110715-1214.zip	20399 KB	12/02/13 00:00:00
HUM-17279-CWF-110714-0001-110716-0048.zip	22027 KB	12/02/13 00:00:00
HUM-17279-CWF-110714-0001-110716-1308.zip	21910 KB	12/02/13 00:00:00
HUM-17279-CWF-110714-0001-110717-0128.zip	21853 KB	12/02/13 00:00:00
HUM-17279-CWF-110714-0001-110717-1409.zip	20863 KB	12/02/13 00:00:00
HUM-17279-CWF-110714-0001-110718-0238.zip	21207 KB	12/02/13 00:00:00
HUM-17279-CWF-110714-0001-110718-1458.zip	21537 KB	12/02/13 00:00:00
HUM-17279-CWF-110714-0001-110719-0328.zip	21641 KB	12/02/13 00:00:00
HUM-17279-CWF-110714-0001-110719-1548.zip	21004 KB	12/02/13 00:00:00
HUM-17279-CWF-110714-0001-110720-0408.zip	21094 KB	12/02/13 00:00:00
HUM-17279-CWF-110714-0001-110720-1629.zip	21064 KB	12/02/13 00:00:00
HUM-17279-CWF-110714-0001-110721-0452.zip	20696 KB	12/02/13 00:00:00
HUM-17279-CWF-110714-0001-110721-1729.zip	20333 KB	12/02/13 00:00:00
HUM-17279-CWF-110714-0001-110729-1227.zip	20325 KB	12/02/13 00:00:00
HUM-17279-CWF-110714-0001-110730-0256.zip	20446 KB	12/02/13 00:00:00
HUM-17279-CWF-110714-0001-110730-1519.zip	21120 KB	12/02/13 00:00:00
HUM-17279-CWF-110714-0001-110731-1244.zip	20568 KB	12/02/13 00:00:00

B.4 – Características técnicas parque eólico da Meroicinha



Parque Eólico **Meroicinha**

Enquadramento

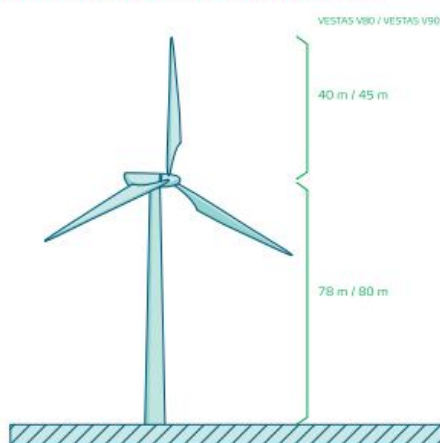
O Parque Eólico da Meroicinha, com 9 MW, entrou em produção em 2004. Está situado em Vila Real e é detido pela empresa Hidromarão - Sociedade Produtora de Energia, S.A.



Principais Factos

Empresa	Hidromarão, S.A.
Localização	Vila Real
Desenvolvimento	Greenfield
Data de Entrada em Exploração	2004
Potência Instalada	9 MW

Medidas da Turbina Eólica



Características Técnicas

Parque Eólico

N.º de Turbinas Eólicas	4
Tensão de Ligação à Rede	30 kV
Emissões de CO ₂ Evitadas	13.433 ton
Produção Anual Estimada (P50 Lahmeyer)	24 GWh

Turbinas Eólicas

Fabricantes	VESTAS	VESTAS
Modelo	V80	V90
N.º de Turbinas Eólicas	3	1
Pot. de cada Turbina Eólica	2.000 kW	3.000 kW
Altura da Torre	78 m	80 m
Diâmetro do Rotor	80 m	90 m
Vel. de Rotação da Turbina	9-19 rpm	10,5-24,4 rpm
Pesos		
Nacelle	61 t	68 t
Rotor	37 t	40 t
Torre	142 t	156 t

Curva de Potência



Anexo C

C.1 – Informação técnica dos sensores de vibração - CMS



Brüel & Kjær Vibro

AS - 062 DATA SHEET

Acceleration Sensor with constant current power

AS - 062

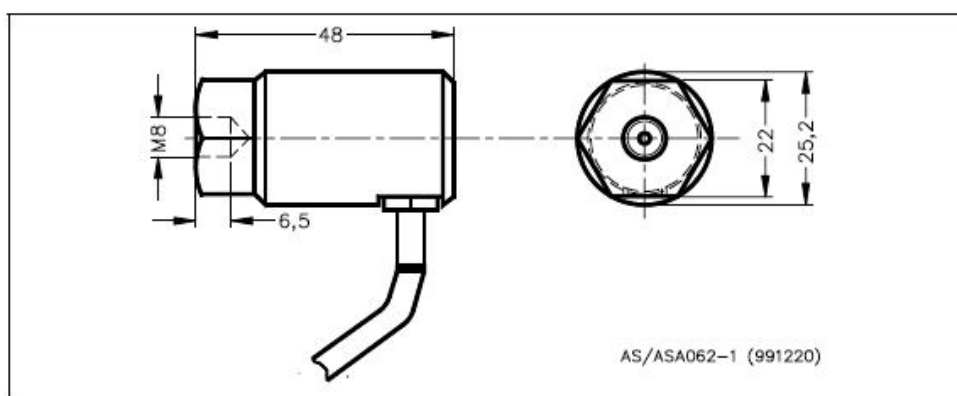


Fig. 1 Dimensions

1 Application

The AS-062 is mainly used for measurement of vibration acceleration at rotating machines such as turbines, pumps, compressors, etc.

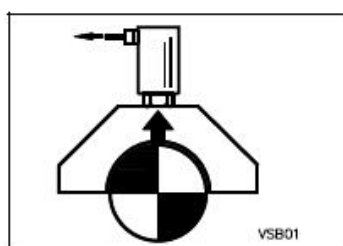
2 Measurement principle

The acceleration sensor operates according to the piezo-electric compression principle. A piezo-ceramic disc and an internal sensor mass form a spring-mass system in the sensor.

If this system is subjected to vibrations the mass produces an alternating force on the ceramic disc. As a result of the piezo effect this produces an electrical charge that is proportional to vibration acceleration.

An integrated amplifier converts this charge signal into a usable voltage signal.

2.1 Polarity



A movement of the bearing housing in the direction shown below produces a positive signal.

3 Technical Data

Transmission factor (referred to the measured value at 80 Hz and 25 °C)	100 mV/g	± 5 %
	10,2 mV/m/s ²	± 5 %

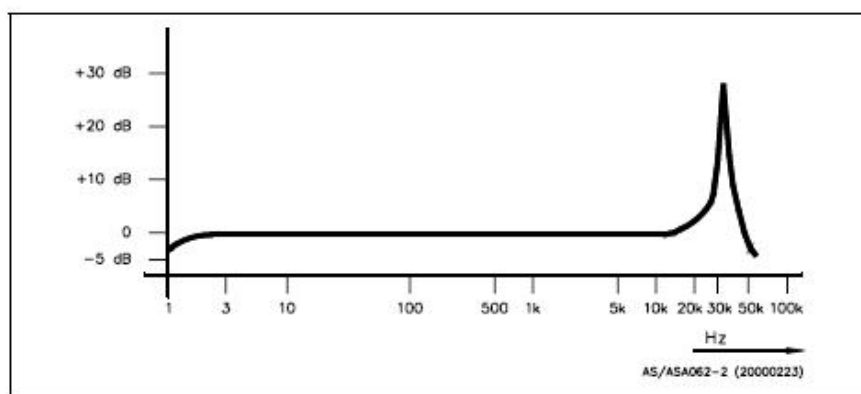


Fig. 2 Typical frequency response curve of the transmission factor

Overload capacity	continuous 500 g shock 5000 g (any direction)
Operating temperature range	-50 °C ... + 125 °C
Storage temperature range	-50 °C ... + 125 °C
Measuring range	± 80 g ($U_{\max} = + 24 \text{ V} \dots + 30 \text{ V}$) ± 40 g ($U_{\max} = + 20 \text{ V}$) ± 20 g ($U_{\max} = + 18 \text{ V}$)
Transverse sensitivity (80 Hz)	≤ 8 ... 10 %
Operating frequency range	4 Hz ... 10 kHz ± 5 % 1,5 Hz ... 13 kHz (± 3 dB)
Resonance frequency	> 20 kHz
Constant-current supply I_B	4 mA (2 mA ... max. 10 mA) polarised
Power U_{\max}	+ 24 V (+ 18 V ... + 30 V) DC polarised
Dynamic internal resistance of output	≤ 300 Ω (Operating frequency range) approx. 2 kΩ (Resonance frequency) (Level control 1 V _{eff} $I_B = 4 \text{ mA}$)
Passive potential (-50 °C ... + 100 °C)	+ 12,5 V ± 1,5 V
Sensitivity response to temperature	≤ 5 % of meas. value (ref. at 25 °C)
Distortion sensitivity	< 0,002 g/(μm/m)
Magnetic field sensitivity	< 80 Hz: 0,001 g/mT < 1 kHz: 0,014 g/mT

C.2 – Informação técnica dos sensores de vibração baixa frequência - Torre

SENSONICS LTD

Northbridge Road
Berkhamsted
Herts
HP4 1EF
UK

Telephone: +44 (0) 1442 876 833
Fax: +44 (0) 1442 876 477
E-mail: sales@sensonics.co.uk
Web site: www.sensonics.co.uk

SP4 Series Accelerometers

Without Cal facility

Handbook Ref: HB.1370

This handbook covers the general series of SP4 accelerometers together with some guidance on successful installation and use.

The instrument is a large piezo-electric device with integral electronics contained within an environmentally sealed stainless steel case. The SP4 series offers different levels of mechanical case and mounting arrangements, and connection types.

The SP4 is a low frequency transducer typically down to 0.1 Hz and may be used for low speed bearing vibration, seismic monitoring and pipeline vibration etc.

For more information, please refer to the individual data sheets. An electrical schematic is given in Fig.1. Other base types and threads are available.

Mounting

The quality of the measured signal, particularly at higher frequencies, is dependent upon correct mounting: -

Acceleration Sensitive Axis.

This is coincident with the cylindrical axis of the transducer body. For vertical vibration sensing the transducer base is therefore fixed to a horizontal surface so that the body stands vertical.

Mounting Surface.

This should be as smooth and flat as is reasonably possible to achieve on site, e.g. a ground flat finish. However, the flatness of the surface that is in contact with the vibration mount foot print must be within a tolerance of 0.01mm, e.g. across the whole area of the vibration mount foot print, no gap bigger than a 0.01mm feeler gauge.

The surface must not be painted but a very light smear of grease (e.g. silicon high vacuum grease) between the accelerometer base and the mounting surface is not only acceptable but may help to achieve the best mechanical coupling.

The use of washers or similar to give a flat mounting surface will result in a limited frequency response and under some circumstances will result in resonance of the transducer.

C.3 – Informação técnica dos rolamentos da caixa multiplicadora



Bearing Data

Position	INA / FAG Bearing	Abmessungen						Rolling Element	Contact Angle
		Inner-Ø	Outer-Ø	Width	Pitch-Ø	IR raceway-Ø	OR raceway-Ø	Number	
		d [mm]	D [mm]	B [mm]	dM [mm]	[mm]	[mm]	Z	AlphaK [°]
256	SL1818/560 E BR GKSL0504	560	680	56	616,1	588,1	644,1	69	
255	SL1818/600 E BR N1 GKSL0504	600	730	60	660,1	630,1	690,1	69	
248	F-239375	245	390	175	316,6	271,6	361,6	2 x 22	
450	F-808401A.J30PC	220	460	145	345	277	413	14	
151	31326X	130	280	144	222,3			16	28,8
150	N2326E-MP1B-C3-J30PC	130	280	93	207	167	247	14	

Tolerâncias, ver texto também
Folga axial interna, ver texto também
Ajustes recomendados
Tolerâncias do eixo e da caixa

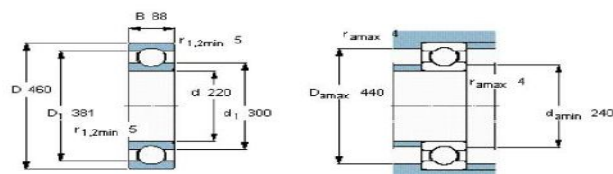
Dimensões principais		Capacidades de carga		Carga limite de fadiga	Velocidades	Velocidade	Massa	Designação
d	D	B	C	C ₀	P _u	de referência	limite	
mm			kN		kN	r/min	kg	* - Rolamento SKF Explorer
150	225	35	216	305	9,5	2800	4500	QJ 1030 N2MA
150	270	45	400	570	16,6	3000	4000	QJ 230 N2MA *
150	320	65	530	765	21,2	2600	3600	QJ 330 N2MA *
160	240	38	247	355	10,6	2600	4300	QJ 1032 N2MA
160	290	48	450	670	19	2800	3800	QJ 232 N2MA *
160	340	68	570	880	23,6	2400	3400	QJ 332 N2MA *
170	310	52	455	720	20	2600	3400	QJ 234 N2MA *
170	360	72	655	1040	27	2200	3200	QJ 334 N2MA *
180	320	52	475	765	20,8	2400	3400	QJ 236 N2MA *
180	380	75	680	1020	28	2200	3000	QJ 336 N2MA *
190	340	46	338	510	14	2200	3400	QJ 1038 N2MA
190	340	55	488	780	20,4	1900	3200	QJ 238 N2MA
190	400	78	702	1160	28,5	1700	2800	QJ 338 N2MA
200	310	51	390	620	16,6	2000	3200	QJ 1040 N2MA
200	360	58	540	915	23,2	1800	3000	QJ 240 N2MA
200	360	70	520	865	21,6	1800	3000	QJ 1240 N2MA
220	400	78	592	1020	24,5	1600	2600	QJ 1244 N2MA
220	460	88	904	1660	38	1500	2400	QJ 344 N2/309829
220	460	88	780	1400	32	1500	2400	QJ 344 N2MA
240	440	72	650	1200	27,5	1500	2400	QJ 248 N2MA
240	440	85	663	1220	28	1500	2400	QJ 1248 MA/344524
260	480	80	728	1430	32	1300	2200	QJ 252 N2MA
260	480	90	741	1460	32	1300	2200	QJ 1252 MA
260	480	90	741	1460	32	1300	2200	QJ 1252 N2MA
280	420	65	553	1060	24	1400	2400	QJ 1056 N2MA

1 2 3 4 5

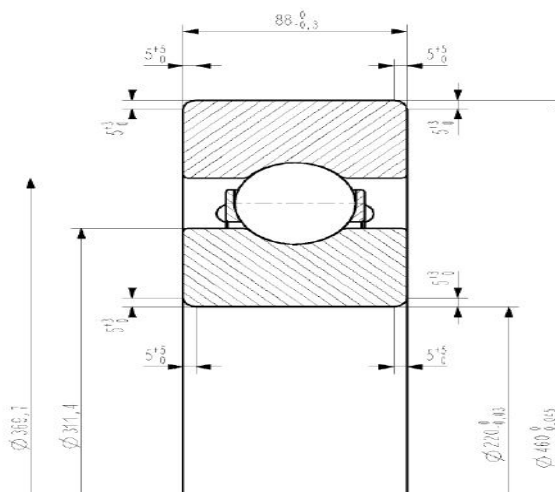


Dimensões principais			Capacidades de carga		Carga limite de fadiga	Velocidades		Massa	Designação
d	D	B	C	C ₀	P _u	Velocidade de referência	Velocidade limite		
mm			kN		kN	r/min		kg	-
220	460	88	410	520	12	3000	2600	72,5	6344 M


Dimensões principais			Capacidades de carga		Carga limite de fadiga	Velocidades		Massa	Designação
d	D	B	C	C ₀	P _u	Velocidade de referência	Velocidade limite		
mm			kN		kN	r/min		kg	-
220	460	88	410	520	12	3000	2600	72,5	6344 M



Fatores de cálculo
 k_r 0,03
 f_0 14



C.4 – Informação técnica das rodas dentadas da engrenagem

		Ersatzteilliste (EL) Spare parts list		Bauart PEAB Type Größe 4435,1 Size Übersetzung 110,757 ratio		Seite Page 1/2
Bei Korrespondenz bitte angeben Please quote in correspondence				see below EL 4807157-020 DE/EN		
Hierzu gehört Zeichnungs-Nr. Please refer to DWG No. 6075884						
Teil-Nr.	Menge	Benennung	Zeichnungs-Nr.	Material-Nr.	Gw(kg)	
Part No.	No. off	Description	Drawings No.	Ident no.	Weight	
E 0044	1	ST THERMOM-WIDST MBT5250 EL=100 DANFOSS RESISTANCE THERMOMETER MBT5250 EL=100		000.001.153.512	0,1	
E 0054	1	ST THERMOM-WIDST MBT5310 EL=128 SO DANFOSS RESISTANCE THERMOMETER MBT5310 EL=128 SO		000.001.162.124	0,1	
E 0056	1	ST THERMOM-WIDST MBT5310 EL=128 SO DANFOSS RESISTANCE THERMOMETER MBT5310 EL=128 SO		000.001.162.124	0,1	
E 0070	3	ST HEIZSTAB O/52 0800W690V 0500LG HELIOS TT HEATING CARTRIDGE O/52 0800W690V HELIOS		000.001.285.217	2,5	
E 0085	2	ST DICHTUNG 170X125X1,5 AFM30 SEAL 170X125X1,5 DILUFLEX	6080306/-	000.001.285.215	0,1	
E 0100	1	ST STRDWELLE LP 460,0/4,63 SE LK1 1.6587 PINION SHAFT LP 460,0/4,63 SE LK1 1.6587 ZÄHNEZAHL/NO.OF TEETH/NO.DENTS: 24	6014430/G	000.001.226.701	107,0	
E 0150	1	ST WÄELZL 2326 N A1/S/MMC3X267 NSK/FAG ROLLG BRG 2326 N A1/S/MMC3X267 NSK/FAG		000.001.155.438	34,0	
E 0151	1	ST EINBAUS 31326/DF A.SONDER H167C SK/FA/NS PAIR TR BEARINGS 31326/DF A.SONDER H167C		000.000.380.691	59,1	
E 0206	1	ST STIRNRAD,INVERZ SCHRAEG SE/GS 34CrNiMo6 INTERN.TOOTHEDED GEAR WHEEL SCHRAEG SE/GS ZÄHNEZAHL/NO.OF TEETH/NO.DENTS: 86	6018461/J	000.001.293.551	1.580,0	
E 0227	1	ST STRDW-PLA LP 435,0/1,74 SE/GS 1.6587 PLANETARY CYLINDRICAL WHEEL SHAFT LP 435 ZÄHNEZAHL/NO.OF TEETH/NO.DENTS: 19	6077578/A	000.001.293.556	470,0	
E 0231	4.800,00	MM SCHNUR-RD 05,0 72NBR872 ROUND CORD 05X200 METER 72NBR872		000.000.307.223	0,0	
E 0234	2	ST O-RING OR0024 -03,5 W 5713 72NBR872 O-RING OR0024 -03,5 W 5713 72NBR872		000.000.306.526	0,1	
E 0235	4.800,00	MM SCHNUR-RD 05,0 72NBR872 ROUND CORD 05X200 METER 72NBR872		000.000.307.223	0,0	
E 0241	3	ST STIRD-PLA RP 435,0/1,74 SE/GS 1.6587 PLANET PINION RP 435,0/1,74 SE/GS 1.6587 ZÄHNEZAHL/NO.OF TEETH/NO.DENTS: 33	6205234/-	000.001.412.189	282,0	
E 0248	6	ST WÄELZL F-239375.01 INA/NSK ROLLG BRG F-239375.01 INA/NSK		000.001.159.741	77,5	
E 0253	1	ST TRAEGER-PLA AV 435 SE EN-JS1102 PLANETARY CARRIER AV 435 SE EN-JS1102	6070592/-	000.001.275.419	2.380,0	
E 0255	1	ST WÄELZL1818/600A GKSL504 BR H167C INA ROLLG BRG 1818/600A GKSL504 BR H167C INA		000.001.155.539	49,3	
E 0256	1	ST WÄELZL1818/560 GKSL504 E N1 BR H167C INA ROLLG BRG 1818/560 GKSL504 E N1 BR H167C		000.001.156.880	39,6	
E 0300	1	ST WELLE-HOHL 538X270X0715 SE 42CrMo4 HOLLOW SHAFT 538X270X0715 SE 42CrMo4	6013204/H	000.001.223.040	600,0	
E 0302	1	ST STIRNRAD LP 705,0/4,33 SE 1.6587 GEAR WHEEL LP 705,0/4,33 SE 1.6587 ZÄHNEZAHL/NO.OF TEETH/NO.DENTS: 91	6013660/I	000.001.286.092	1.800,0	
Die mit * gekennzeichneten Teile gehören zu einer Baugruppe (G). Die Baugruppe ist nur komplett auszutauschen. The parts marked with * belong to a subassembly (G). The subassembly must be replaced complete.						
Winergy AG, Postfach 201160, 46553 Voerde, Tel.+49(0)2871/92-1700 Fax+49(0)2871/922596,http://www.winergy-ag.com			Datum Date 31.01.2011	SCHEIBE, HERBERT Rev.:	1568 EGE.FR	



Ersatzteilliste (EL)
Spare parts list

Bauart
Type

Größe
Size

Übersetzung
ratio

PEAB
4435,1
110,757

Seite
Page

2/2

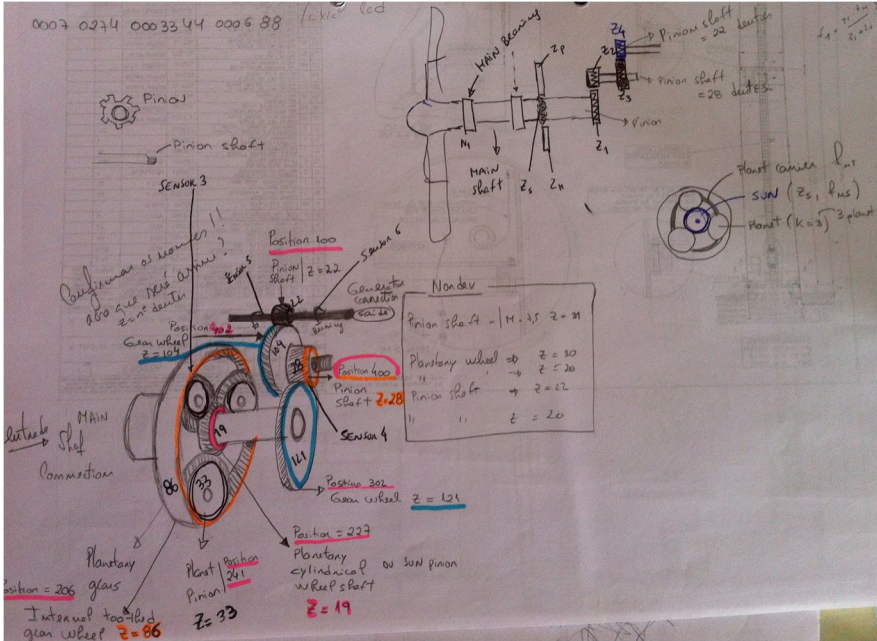
Bei Korrespondenz bitte angeben
Please quote in correspondence

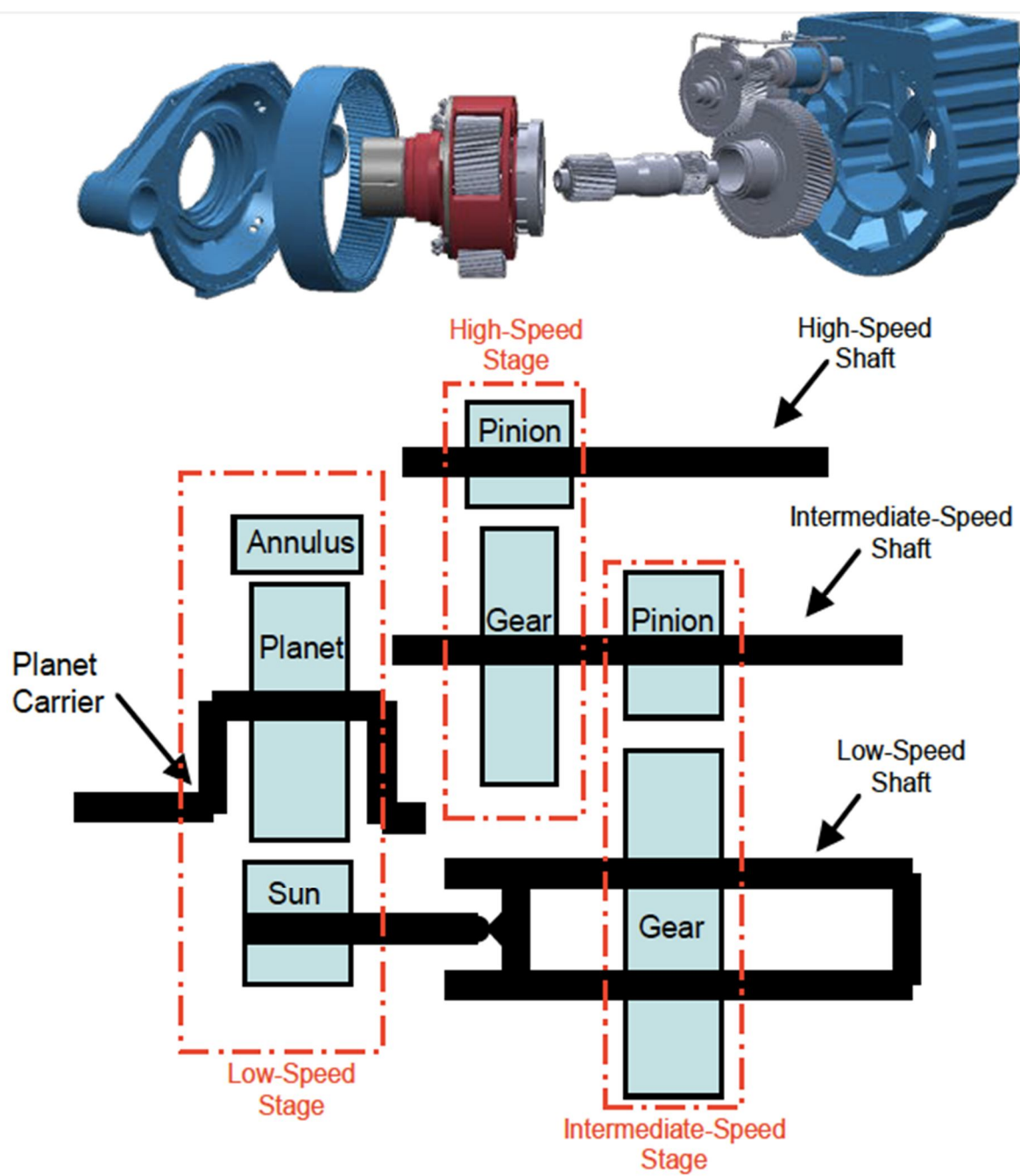
see below
EL 4807157-020 DE/EN


Hierzu gehört Zeichnungs-Nr.
Please refer to DWG No.

6075884

Teil-Nr.	Menge	Benennung	Zeichnungs-Nr.	Material-Nr.	Gw(kg)
Part No.	No. off	Description	Drawings No.	Ident no.	Weight
E 0350	1	ST WAE LZL F-552648.01 H167C INA ROLLG BRG F-552648.01 H167C INA		000.001.155.874	59,1
E 0351	1	ST WAE LZL F-554758 NF H167C INA/NSK ROLLG BRG F-554758 NF H167C INA/NSK		000.001.155.437	100,0
E 0357	1	ST WAE LZL 6224-2RS1 D 625 MET-KAEF ROLLG BRG 6224-2RS1 D 625 MET-KAEF		000.000.813.809	5,2
E 0360	2	ST O-RING OR0110 -03 W 5713 72NBR872 O-RING OR0110 -03 W 5713 72NBR872		000.000.306.788	0,0
E 0400	1	ST STRDWELLE RP 705,0/4,33 SE 1.6587 PINION SHAFT RP 705,0/4,33 SE 1.6587 ZÄHNEZAHL/NO.OF TEETH/NO.DENTS: 21	6013611/F	000.001.286.093	307,0
E 0402	1	ST STIRNRAD RP 460,0/4,63 SE 1.6587 GEAR WHEEL RP 460,0/4,63 SE 1.6587 ZÄHNEZAHL/NO.OF TEETH/NO.DENTS: 111	6014432/H	000.001.226.727	570,0
E 0450	1	ST WAE LZL 2344 NJ 808401 H167C FAG/NSK ROLLG BRG 2344 NJ 808401 H167C FAG/NSK		000.001.155.049	121,0
E 0451	1	ST WAE LZL 2344 NJ 808401 H167C FAG/NSK ROLLG BRG 2344 NJ 808401 H167C FAG/NSK		000.001.155.049	121,0
E 0452	1	ST THERMOM-WIDST MBT5310 EL=128 SO DANFOSS RESISTANCE THERMOMETER MBT5310 EL=128 SO		000.001.162.124	0,1
E 0453	1	ST THERMOM-WIDST MBT5310 EL=128 SO DANFOSS RESISTANCE THERMOMETER MBT5310 EL=128 SO		000.001.162.124	0,1





		Ersatzteilliste (EL) Spare parts list		Bauart PEAB Type Größe 4435,0 Size Übersetzung 113,206 ratio		Seite Page 1/2
Bei Korrespondenz bitte angeben Please quote in correspondence				see below EL 4810300-020 DE/EN		
Hierzu gehört Zeichnungs-Nr. Please refer to DWG No.				6020653		
Teil-Nr. Part No.	Menge No. off	Benennung Description	Zeichnungs-Nr. Drawings No.	Material-Nr. Ident no.	Gw(kg) Weight	
Z 0044	1	ST THERMOM-WIDST MTS3250 EL=100 DANFOSS RESISTANCE THERMOMETER MTS3250 EL=100		000.001.133.512	0,1	
Z 0054	1	ST THERMOM-WIDST MTS3310 EL=128 DANFOSS RESISTANCE THERMOMETER MTS3310 EL=128		000.001.133.513	0,1	
Z 0056	1	ST THERMOM-WIDST MTS3310 EL=128 DANFOSS RESISTANCE THERMOMETER MTS3310 EL=128		000.001.133.513	0,1	
Z 0070	3	ST HEISSTAB 0/52 0800W690V 0300LG HELIOS HEATING CARTRIDGE 0/52 0800W690V HELIOS		000.000.653.962	2,5	
Z 0085	2	ST DICHTUNG 170X125X1,5 SEAL 170X125X1,5 DILAFLEX	6001573/-	000.000.653.986	0,1	
Z 0100	1	ST STERNWELLE LF 460,0/4,73 SE LK1 1.6587 FINION SHAFT LF 460,0/4,73 SE LK1 1.6587 SÄHRESAHL/NO.OF TEETH/NO.DENTS: 22	6030589/J	000.001.242.897	97,0	
Z 0150	1	ST WÄHEL 2326 NU ECMG/C3 D 3412 SKF/FAG ROLLG RING 2326 NU ECMG/C3 D 3412 SKF/FAG		000.000.380.188	29,4	
Z 0151	1	ST EINBAUS 31326/DF A.SONDER M167C SKF/FA/NS PAIR IN BEARINGS 31326/DF A.SONDER M167C		000.000.380.692	59,1	
Z 0206	1	ST STERNRAD,INVERSE SCHNABZ SE/GS 34CrNiMo6 INTERM.TOOTHEED GEAR WHEEL SCHNABZ SE SÄHRESAHL/NO.OF TEETH/NO.DENTS: 86	6018461/J	000.001.222.899	1.380,0	
Z 0227	1	ST STERN-FLA LF 435,0/1,74 SE LK1 1.6587 PLANETARY CYLINDRICAL WHEEL SHAFT LK1 SÄHRESAHL/NO.OF TEETH/NO.DENTS: 19	6012630/M	000.001.222.939	470,0	
Z 0231	4.800,00	MM SCHNUR-RD 05,0 ROUND CORD 05X200 METER 712H872	712H872	000.000.307.223	0,0	
Z 0234	2	ST O-RING OR0024 -03,5 N 5713 O-RING OR0024 -03,5 N 5713 712H872	712H872	000.000.306.526	0,1	
Z 0235	4.800,00	MM SCHNUR-RD 05,0 ROUND CORD 05X200 METER 712H872	712H872	000.000.307.223	0,0	
Z 0241	3	ST STERN-FLA RF 435,0/1,74 SE 1.6587 PLANET FINION RF 435,0/1,74 SE 1.6587 SÄHRESAHL/NO.OF TEETH/NO.DENTS: 33	6012782/M	000.001.222.974	282,0	
Z 0248	6	ST WÄHEL HNCF245X390X175 M167C F-239375 ROLLG RING HNCF245X390X175 M167C F-239375		000.001.151.829	78,0	
Z 0253	1	ST TRÄGER-FLA AV 435 SE ZH-JG1102 PLANETARY CARRIER AV 435 SE ZH-JG1102	6012371/N	000.001.245.538	2.380,0	
Z 0255	1	ST WÄHEL1818/600 GWSL304 M167C INA ROLLG RING 1818/600 GWSL304 M167C INA		000.001.151.262	49,3	
Z 0256	1	ST WÄHEL1818/560 GWSL304 E NIM167C INA/HBK ROLLG RING 1818/560 GWSL304 E NIM167C I/N		000.001.156.879	39,6	
Z 0300	1	ST WELLE-HOHL 538X270X0715 SE 42CrMo4 HOLLOW SHAFT 538X270X0715 SE 42CrMo4	6013204/M	000.001.223.040	600,0	
Z 0302	1	ST STERNRAD LF 705,0/4,33 SE 1.6587 GEAR WHEEL LF 705,0/4,33 SE 1.6587 SÄHRESAHL/NO.OF TEETH/NO.DENTS: 91	6013660/I	000.001.223.063	1.800,0	
Die mit * gekennzeichneten Teile gehören zu einer Baugruppe (G). Die Baugruppe ist nur komplett auszutauschen. The parts marked with * belong to a subassembly (G). The subassembly must be replaced complete.						
Winergy AG, Postfach 201160, 46553 Voerde, Tel.+49(0)2871/92-1700 Fax+49(0)2871/922596,http://www.winergy-ag.com			Datum Date 31.01.2011	BOEING, ALFONS Rev.:	3771	EGE.FR

C.5 – Informação dos tipos de óleo para caixas multiplicadoras

Tipos de óleo que podem ser encontrados nas caixas multiplicadoras:

Tipo de óleo	Equipamento	Fabricante	Periodicidade da substituição	Nº de SAP para 20 litros
Mobilgear XMP 320	Caixa multiplicadora	Eickhoff/Winergy/Bosch Rexroth	3 anos	14870
Castrol Optigear Synthetic A320	Caixa multiplicadora	Eickhoff/Winergy/Bosch Rexroth	3 anos	18821
Castrol Optigear Synthetic X320	Caixa multiplicadora	Eickhoff/Bosch Rexroth	3 anos * ²	NA
Fuchs Gearmaster Eco	Caixa multiplicadora	Eickhoff	1 ano * ¹	NA
Mobil SHC 629	Caixas de yaw e pitch	Schaefer, Comer	5 anos	14872
Mobil DTE 24	Sistema hidráulico	Hydac	-----	14871

*¹ Usado no passado apenas para limpeza de lamas e vernizes

*² Usado para substituir o Castrol A320 ou para limpeza da caixa

C.6 – Informação dos diferentes tipos de armazenamento



1000 litros



208 litros



20 litros

Anexo D

D.1 – Características dos Aerogeradores Nordex

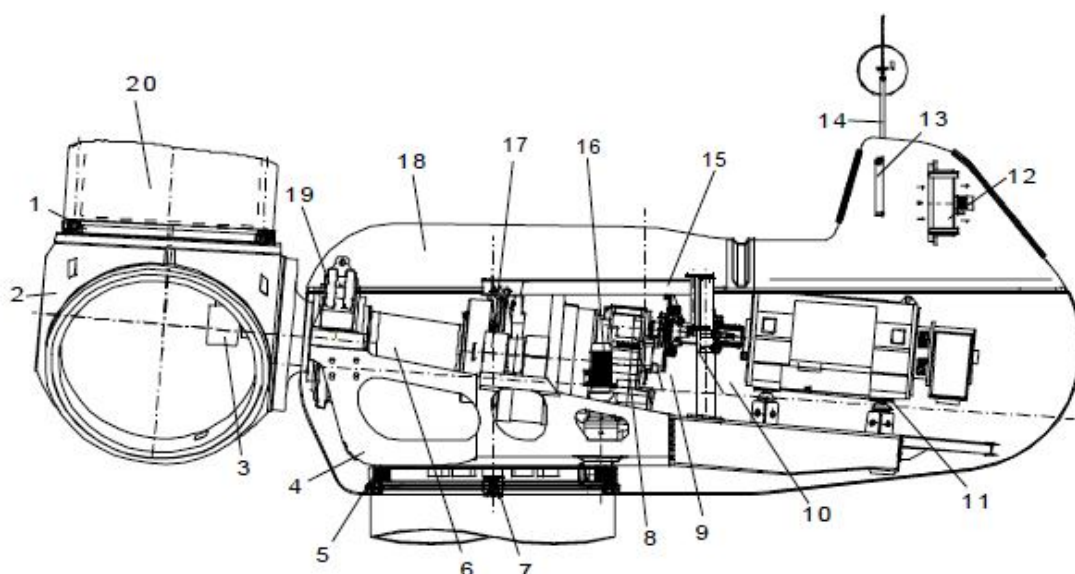
1 Design

The NORDEX N90/2500 is a speed-variable wind turbine with a rotor diameter of 90m and a nominal power of 2,500kW. It is offered in several variants for different site conditions, 50Hz and 60Hz and also LS and HS (low speed, high speed). The nacelle and rotor are designed for wind class 1. To regulate power the blades can be pitched individually.

This machine is based on the well proven turbine family NORDEX N80/2500, N90/2300.

NORDEX is certified according to ISO 9001 quality standards. Our quality control system and thus also the production processes fulfil the requirements of ISO 9001. For all main components NORDEX co-operates with a number of qualified suppliers.

Nacelle overview NORDEX N90/2500



- | | | | |
|-----------------|-----------------------|---------------------|--------------------|
| 1 Pitch bearing | 6 Rotor shaft | 11 Generator | 16 Yaw drive |
| 2 Rotor hub | 7 Yaw brakes | 12 Gearbox cooler | 17 Gearbox support |
| 3 Pitch drive | 8 Gearbox | 13 Generator cooler | 18 Cabin |
| 4 Nacelle frame | 9 Rotor brake | 14 Wind sensors | 19 Rotor bearing |
| 5 Yaw ring | 10 Generator coupling | 15 Board crane | 20 Rotor blade |

NORDEX N90/2500 – Technical description



General Data	
Type	3-blade rotor with horizontal axis, up-wind
Power regulation	pitch
Nominal power	2,500kW
Cut-in wind speed	approx. 3m/s
Wind speed for nominal power	LS: approx. 14m/s HS: approx. 13m/s
Cut-out wind speed	25m/s
Calculated lifetime	20years

Climatic Design Conditions	
Nacelle and rotor certified acc. to	LS: DIBt 3, IEC 2a HS: IEC 1b
Ambient temperature range	-20...+30°C
Option for hot climate version (HCV)	-20...+40°C

2 Rotor

The rotor consists of 3 blades, the hub, the pitch bearings and drives to change the pitch angle of the blades. The rotor blades are made of fibreglass reinforced plastic. Each rotor blade is controlled and driven independently of the other blades. The blades are equipped with a lightning protection system including lightning receptors deflecting the lightning into the rotor hub.

Rotor main data	
Rotor diameter	90m
Swept area	6,362m ²
Maximum tip speed	LS: approx. 70m/s HS: approx. 75m/s
Specific power	393W/m ²
Rotor speed N90/2500 LS	9.6...14.85rpm
Rotor speed N90/2500 HS	9.6...16.00rpm
Rotor tilt angle	5°
Blade cone angle	2°
Total weight	approx. 55t

Rotor hub	
Material	spheroidal graphite cast iron EN-GJS-400-18U-LT
Total weight, incl. pitch system	approx. 25t

Rotor blades	
Material	glass fibre-reinforced plastic
Total length	43.8m
Weight per blade	approx. 10.2t

3 Rotor shaft

The drive train consists of the rotor shaft, the gearbox connected by a shrink disc, a coupling with overload protection and the generator.

Rotor shaft	
Material	42CrMo4 or 34CrNiMo6
Weight	approx. 11.6t
Bearing	self-aligning roller bearing
Bearing housing	spheroidal graphite cast iron EN-GJS-400-18U-LT



4 Gearbox

The gearbox is designed as a multi-stage planetary and one-stage spur gear. Alternatively a linkage with power split is also possible. The gearbox is cooled through an oil-air cooling circuit with stepped cooling capacity. The bearings and tooth engagements are constantly pump-fed lubricated with cooled oil. The temperatures of the bearings and the oil are constantly monitored.

Gearbox	
Type	multi-stage planetary + one-stage spur gear
Nominal power	2,775kW
Gear ratio N90/2500 LS	50Hz: 1 : 77.44 60Hz: 1 : 92.93
Gear ratio N90/2500 HS	50Hz: 1 : 71.88 60Hz: 1 : 86.25
Lubrication	pump-fed lubricated
Oil quantity	approx. 360l
Oil type	VG 320
Oil change	check at every maintenance, change as required
Weight	approx. 18.5t

5 Generator

The generator is a double-fed asynchronous machine. The generator is kept in its optimum temperature range by a cooling circuit.

Generator	
Type of enclosure	IP 54
Nominal power	2,500kW
Nominal voltage	660V
Frequency	50 or 60Hz
Speed	740...1,310rpm
Poles	6
Weight	approx. 12t

6 Cooling and filtration

The gearbox, generator and converter of the turbine have cooling systems which are independent from each other. All systems are designed such that even at high ambient temperatures, optimal operating temperatures are achieved. The temperature of some gearbox bearings, the gearbox oil, the generator windings, the generator bearings and the cooling liquid (frost resistant water/glycol mixture) are monitored constantly and partially redundantly by the control system.

Gearbox cooling

The gearbox is cooled by the oil circuit in an oil/air heat exchanger. A pump with 2 stages pushes the gearbox oil through a combined filter (coarse filter 50µm, fine-mesh filter 10µm) into the cooling circuit. The coarse and fine-mesh filters filter impurities out of the oil. The control system monitors the level of contamination of the filter elements (differential pressure measurement).

Optionally, an additional bypass filtration can be installed (super fine-mesh filter 5µm).

D.2 – Características dos Aerogeradores Vestas

Class 1
Item no. 944406.R13
2005-12-21

VESTAS V80-2.0 MW OptiSpeed™ Wind Turbine



3. Technical Specifications

3.1 Rotor

Diameter:	80 m
Swept area:	5027 m ²
Rotational speed static, rotor:	18.7 RPM
Rotational speed, operation interval rotor:	9.0 - 19.0 RPM
Rotational direction:	Clockwise (front view)
Orientation:	Upwind
Tilt:	6°
Blade coning	2°
Number of blades:	3
Aerodynamic brakes:	Full feathering

3.2 Blades

Principle:	Shells bonded to supporting beam
Material:	Glass fibre reinforced epoxy
Blade connection:	Steel root inserts
Air foils:	NACA63.xxx+FFA-W3
Length:	39 m
Chord (width) (blade root/blade tip):	3.52 m / 0.48 m
Twist (blade root/blade tip):	13°/0°
Weight:	Approx. 6,500 kg each.

3.3 Blade Bearing

Type:	4-point contact ball bearing
-------	------------------------------

3.4 Blade Hub

Type:	Cast ball hub
Material:	EN-GJS-400-18U-LT

3.5 Main Shaft

Type:	Forged, hollow trumpet shaft
Material:	42CrM04/QT/EN10083

3.6 Bearing Housing

Type:	Cast foot housing with lowered centre
Material:	EN-GJS-400-18U

3.7 Main Bearings

Type: Spherical roller bearings from recognised suppliers

3.8 Machine Foundation

Type: Cast EN-GJS-400-18U-LT

3.9 Yaw System

Type: Plain bearing system with built-in friction
 Material: Forged yaw ring heat-treated. Plain bearings PETP.
 Yawing speed: < 0.5°/sec

3.10 Yaw Gears

Type: Planetary-/worm gear combination, 3 step planetary/1 step self locking worm gear
 Motor: 2.2 kW, 6 pole, asynchronous

3.11 Tower (Steel)

Type: Conical tubular
 Material: S 235JO/JR
 Surface treatment: Painted
 Corrosion class, outside: C4 (ISO 12944-2)
 Corrosion class, inside: C3 (ISO 12944-2)
 Top diameter for all towers: 2.3 m
 Bottom diameter for all towers: 4.0 m
Hub Height
 3-parted, modular tower (60 m): 60 m
 3-parted, modular tower (67 m): 67 m
 4-parted, modular tower (78 m): 78 m

The exact hub height is inclusive 0.4 m (distance from the foundation section to earth), and inclusive 1.7 m (distance from top flange to hub)

Lift: As an option VESTAS offers lift

3.12 Gearbox

Type:	1 planetary stage/2 helical stages
Ratio:	50 Hz: 1:100.5 60 Hz: 1:120.6
Cooling:	Pump with oil cooler
Oil heater:	2 kW
Oil filtration:	3 µm filter unit
Manufacturer:	Vestas has more sub-suppliers of gearboxes. All gearboxes are in complies with Vestas specifications.

3.13 Couplings

Main shaft-gearbox:	
Type:	Shrink disc, conical
Gearbox -primary generator:	
Type:	Composite shaft

3.14 Generator with VCS

	Generator
	50 Hz/60Hz
Rated power:	2.0 MW
Type:	Asynchronous with wound rotor, slip rings and VCS
Voltage:	690 VAC
Frequency:	50 Hz / 60Hz
No. of poles:	4
Class of protection:	IP54
Rated speed:	1680 / 2016 RPM
Rated power factor, default:	1.0
Power factor range:	0.98 _{CAP} - 0.96 _{IND} (option). See section 1.5 general reservations.
Manufacturer:	Vestas has more sub-suppliers of generators. All generators are in complies with Vestas specifications.

3.15 Parking Brake

Type:	Disc Brake
Diameter:	600 mm
Disc material:	SJV 300

3.16 Hydraulic Unit

Pump capacity:	44 l/min
Max. pressure:	200 bar
Brake pressure:	40 bar
Oil quantity:	160 l
Motor:	18.5 kW

3.17 Anemometer and Wind Direction Sensor

Type:	2 independent ultrasonic sensors
-------	----------------------------------

3.18 Control Unit

<u>Power current:</u>	
Voltage:	3 x 690 VAC, 3 x 480 VAC
Frequency	50 Hz / (60 Hz)
Power supply for light:	230 VAC / (110V VAC)
<u>Computer:</u>	
Communication:	ArcNet
Program memory:	EPROM (flash)
Programming language:	C++
Configuration:	Modules
Operation:	Numeric keyboard + function keys
Display:	4 x 40 characters
<u>Supervision/control:</u>	Active power Reactive power Yawing Hydraulics Environment (wind, temperature) Rotation Generator Pitch system Grid Remote monitoring
<u>Information:</u>	Operating data Production Operation log Alarm log
<u>Commands:</u>	Run/Pause Man. Yaw start/stop Maintenance routine Possibility of connection of serial communication
REMOTE SUPERVISION	

3.19 Transformer

Type:	50 Hz/(60 Hz)
Rated Power:	Cast resin
High voltage:	2100 kVA
Frequency	6 – 34.5V (36 kV (U _m) equipment voltage)
Vector group:	50 Hz / (60 Hz)
HV – Tappings:	Dyn
	±2 x 2.5%
Low voltage:	690 V
Power at 690 V	1850 kW
Low voltage:	480 V
Power at 480 V	205 kW

3.20 Weights

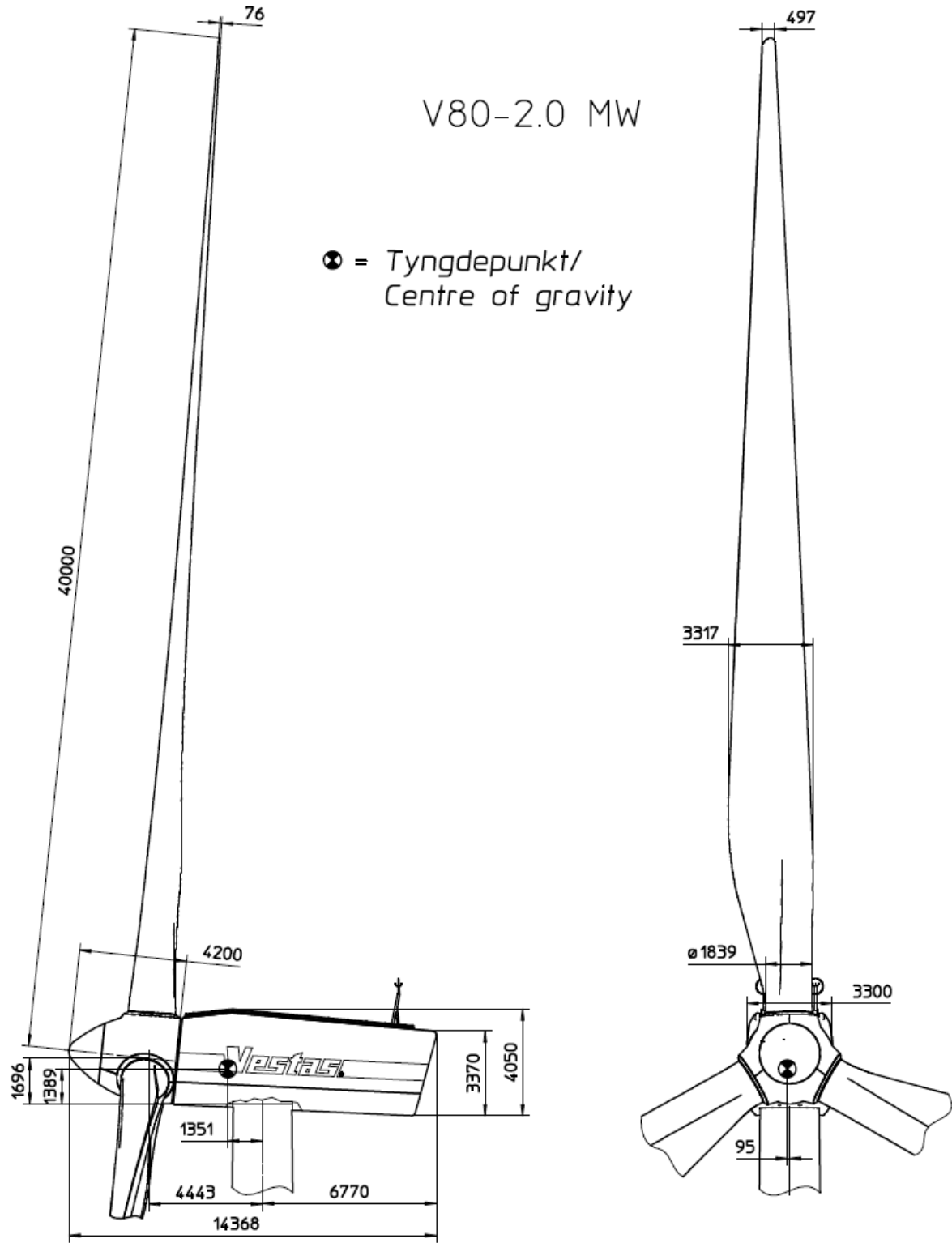
	60 m	67 m	78 m	100m
Tower ¹⁾ :	100.0 t	120.0 t	165.0 t	231.0 t
Nacelle:	67.5 t	67.5 t	67.5 t	67.5 t
Rotor:	37.2 t	37.2 t	37.2 t	37.2 t
TOTAL	198.4 t	218.4 t	263.4 t	329.4 t

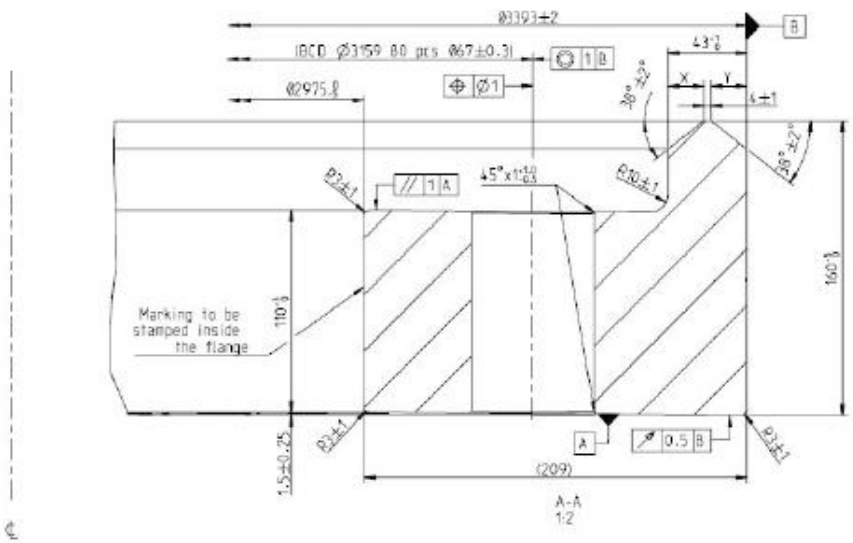
1) Sites where wind loads are acc. to German conditions DIBt zone II.

	60 m	67 m	78 m
Tower ²⁾ :	120.0 t	135.0 t	190.0 t
Nacelle:	67.5 t	67.5 t	67.5 t
Rotor:	37.2 t	37.2 t	37.2 t
TOTAL	218.4 t	233.4 t	288.4 t

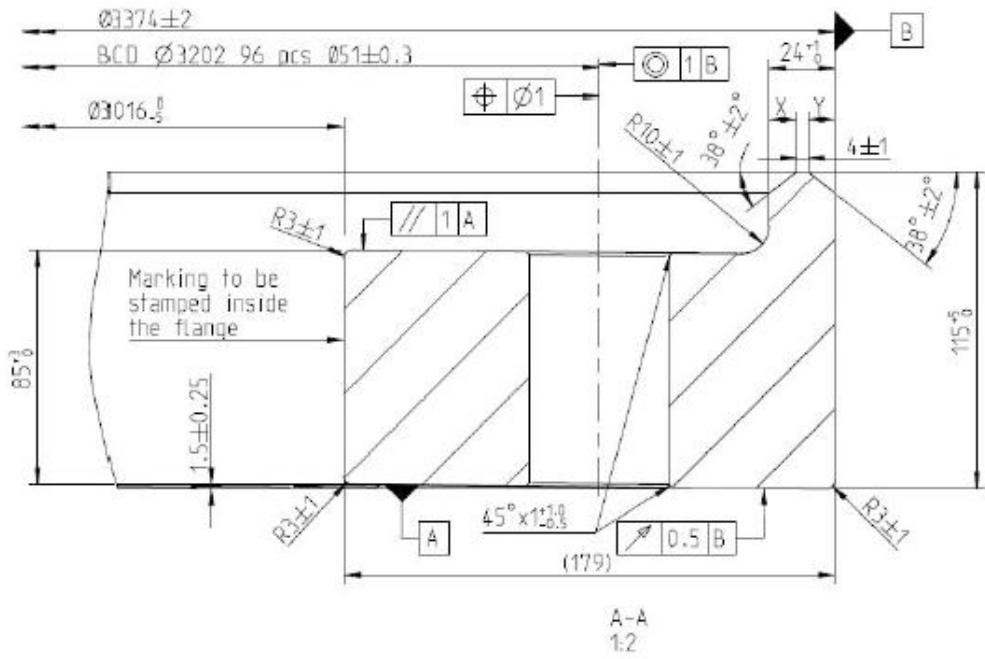
2) Sites where wind loads are acc. to IEC IIA.

At other site conditions, tower weight may be altered.





B - Espessura 2° tramo



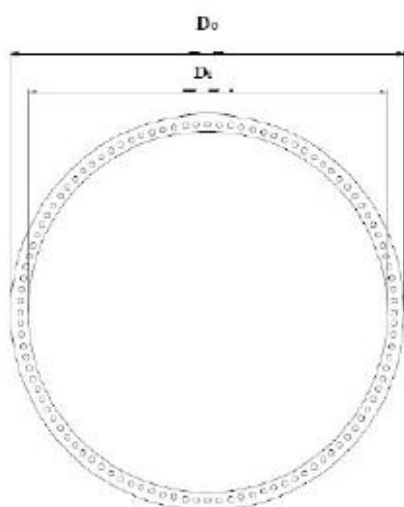


Figure 4-2: Inner and outer diameter.

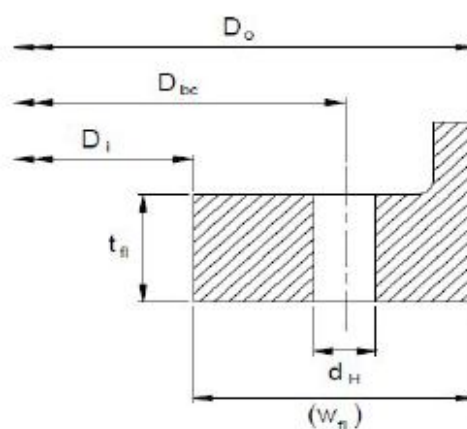


Figure 4-3: L-flange, cross section.

4.2 Outer Dimensions

Component	L	D _A	D _B
Unit of measurement	[mm]	[mm]	[mm]
Bottom section	16010	3393	3374
Second section	24360	3374	3117
Top section	24380	3117	2316

Table 4-2: Outer dimensions.

4.4 Flange Data

Flange assembly	D _{bc}	D _H	No. of holes	t _f	D _i	D _o
Unit of measurement	[Ø in mm]	[Ø in mm]	#	[mm]	[mm]	[mm]
Bottom flange / 1	3159	67	80	110	2975	3393
Middle flange 1 / 2	3202	51	96	85	3016	3374
Middle flange 2 / 3	2983	39	92	55	2821	3117
Top flange / 4	2160	33	90	250	2070	2316

Table 4-4: Flange data.

Anexo G

G.1 – Características da Caixa multiplicadora - Localização dos sensores

